

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CESAR CAYTUIRO TAPIA

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM CONTATOR
ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO SENSORES A FIBRA ÓPTICA**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2020

CESAR CAYTUIRO TAPIA

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM CONTATOR
ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO SENSORES A FIBRA ÓPTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz

PATO BRANCO

2020

T172a Tapia, Cesar Cayturo.
Avaliação das condições de operação de um contator eletromagnético utilizando sensores a fibra óptica / Cesar Cayturo Tapia. -- 2020.
77 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Roel Ortiz
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR,
2020.

Inclui bibliografia.

1. Tensões residuais. 2. Dispositivo eletromagnético. 3. Redes de Bragg.
4. Fibras ópticas. 5. Interferência eletromagnética. I. Sousa, Kleiton de
Moraes, orient. II. Ortiz, Jorge Luis Roel, coorient. III. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD 22. ed. 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 081

**“Avaliação das Condições de Operação de um Contador Eletromagnético
Utilizando Sensores a Fibra Óptica”**

Por

Cesar Cayturo Tapia

Dissertação apresentada às oito horas e trinta minutos do dia vinte e um do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo-assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Kleiton de Moraes Sousa
(orientador)
UTFPR/PB

Dr. Guilherme Dutra
(Participação à distância)
Mentor Photonics /CURITIBA – PR

Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti
UTFPR/PB

Prof. Dr. Uilian José Dreyer
(Participação à distância)
UTFPR/CT

Homologado por:

Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica - PPGEE/UTFPR

Dedico este trabalho a minha amada esposa, Lisbeth e em memoria de meus pais, Augusto e Marina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu a vida, saúde e sabedoria para vencer os obstáculos pelos quais passei durante a realização deste trabalho.

À minha amada esposa Lisbeth, pela compreensão, paciência e total apoio em todos os momentos da minha vida. Sem ela a realização deste trabalho não seria possível.

Aos meus irmãos Alex e Diane, pelo apoio em todo momento.

Ao meu orientador Kleiton De Moraes Sousa e ao meu co-orientador Jorge Luis Roel Ortiz, pela orientação e co-orientação. Meus sinceros agradecimentos.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof. Dr. Fabio Luiz Bertotti, Prof. Dr. Uilian Dreyer e Dr. Guilherme Dutra, por suas contribuições.

Aos professores do PPGEE por me auxiliar em tudo. Principalmente ao Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin.

À minha colega Tatiana, pela amizade e por me ajudar em tudo, quando necessitei no primeiro ano de mestrado.

Ao meu colega Darlei, pela amizade e ajuda durante todo o tempo de mestrado.

Aos colegas do Laboratório integrado de Análise e Processamento de Energia da UTFPR Campus Pato Branco, pela disposição em me ajudar nas dúvidas.

Ao PPGEE, por me aceitar no processo seletivo de bolsas do OEA-Brasil.

O Senhor é a minha rocha, a minha fortaleza e o meu libertador; o meu Deus é o meu rochedo, em quem me refugio. Ele é o meu escudo e o poder que me salva, a minha torre alta.

Salmos 18:2

RESUMO

TAPIA, Cesar Cayturo. AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM CONTATOR ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO SENSORES A FIBRA ÓPTICA. 78 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

Este trabalho apresenta a análise e os resultados obtidos a partir de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica (FBG - do inglês Fiber Bragg Grating) instalados no núcleo fixo de um contator eletromagnético, para medições de temperatura e deformação. Esses resultados podem ser utilizados para analisar o comportamento e antever a necessidade de manutenção preventiva futura do contator. As FBGs podem ser usados para as medições de temperatura e de deformação no núcleo do contator devido ao seu pequeno tamanho e imunidade eletromagnética. Na medição de temperatura do núcleo do contator eletromagnético, observa-se que a estabilidade térmica se atinge em 190 minutos, com uma variação de temperatura de 68 °C. Para a medição da deformação, foram analisadas quatro situações: contator sem falha, contator com queda de tensão, contator com obstáculo no entreferro e contator sem os anéis de curto-circuito. A força eletromagnética, obtida através da medição de deformação, tem uma frequência fundamental de 120 Hz, que é o dobro da frequência da fonte de alimentação para o contator sem falha e com queda de tensão. Essa frequência fundamental é obtida pela aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) do sinal de deformação no regime permanente. Para o contator com obstáculo no entreferro e o contator sem os anéis de curto-circuito, a forma de onda da deformação não é senoidal, devido às colisões dos núcleos fixo e móvel. Na simulação da dinâmica do contator, no *software* Matlab®, a forma de onda da força eletromagnética é similar à forma de onda da deformação do núcleo do contator em condições normais de operação.

Palavras-chave: Contator eletromagnético, Queda de tensão, Rede de Bragg em Fibra Óptica, Força Eletromagnética, Deformação, Temperatura.

ABSTRACT

TAPIA, Cesar Cayturo. EVALUATION OF THE OPERATING CONDITIONS OF AN ELECTROMAGNETIC CONTACTOR USING FIBER OPTIC SENSORS. 78 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

This work presents the analysis and results obtained from the fiber Bragg grating (FBG) sensors installed in the fixed core of an electromagnetic contactor, for temperature and strain measurements. These results can be used to analyze behavior and predict future preventive maintenance of the contactor. FBGs can be used for contactor core temperature and strain measurements due to their small size and electromagnetic immunity. At the electromagnetic core contactor temperature measurement, it is observed that the thermal stability is reached in 190 minutes, with a temperature variation of 68 °C. To the strain measurement, four situations were analyzed: contactor without failure, contactor with voltage sag, contactor with obstacle in the air gap and contactor without shading rings. The electromagnetic force, obtained from the strain measurement, has a fundamental frequency of 120 Hz, which is twice the frequency of the power supply for both the contactor without failure and contactor with voltage sag. This fundamental frequency is obtained by applying the fast Fourier transform (FFT) to the steady state strain signal. For both contactor with obstacle in the air gap and contactor without shading rings, the strain waveform is non-sinusoidal, due to collisions of the fixed and movable cores. In the contactor dynamic simulation, in the Matlab® software, the electromagnetic force waveform is similar to the contactor core strain waveform under normal operating conditions.

Keywords: Electromagnetic contactor, Voltage sag, Fiber Bragg gratings, Electromagnetic Force, Strain, Temperature.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Esquema de estado do contator, (a) em repouso e (b) energizado	23
FIGURA 2	– Esquema geral dos componentes do contator de CA.	24
FIGURA 3	– Esquema de dimensões do núcleo do contator.	26
FIGURA 4	– Circuito magnético equivalente do contator.	27
FIGURA 5	– Esquema das forças na parte do núcleo móvel.	29
FIGURA 6	– Diagrama de disposição das molas.	30
FIGURA 7	– Métodos de sensoriamento: (a) extrínsecos; (b) intrínsecos.	32
FIGURA 8	– Diagrama dos componentes de uma fibra óptica com sensor FBG.	33
FIGURA 9	– Princípio funcionamento de uma FBG: (a) a estrutura da FBG, (b) espectros da luz incidente, refletido e transmitido	34
FIGURA 10	– Princípio de funcionamento de uma FBG: (a) a FBG sujeito a uma mudança na deformação, (b) espectros da luz incidente, refletido e transmitido	38
FIGURA 11	– Princípio de funcionamento de uma FBG: (a) a FBG sujeito a uma mudança à temperatura, (b) espectros da luz incidente, refletida e transmitida.	39
FIGURA 12	– Esquema de incidência do feixe difratado nas ordens $m \pm 1$ e $m=0$.	40
FIGURA 13	– Esquema de gravação de uma FBG pela técnica máscara de fase.	40
FIGURA 14	– Esquema de aquisição de dados	42
FIGURA 15	– Contator eletromagnético WEG CWM500030V26.	44
FIGURA 16	– Componentes do contator WEG CWM500030V26.	44
FIGURA 17	– Esquema de encapsulamento da FBG de temperatura.	47
FIGURA 18	– Esquema do contator com as FBGs de temperatura e os conetores.	48
FIGURA 19	– Esquema do contator com a FBG de deformação e o conector.	50
FIGURA 20	– Circuito de acionamento 1 do contator.	51
FIGURA 21	– Circuito de acionamento 2 do contator.	51
FIGURA 22	– Variação da temperatura do núcleo do contator durante o período de teste.	53
FIGURA 23	– Deformação do núcleo do contator em condições normais de operação.	55
FIGURA 24	– Transiente da deformação do núcleo do contator.	55
FIGURA 25	– Deformação do núcleo do contator no regime permanente.	56
FIGURA 26	– Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator.	56
FIGURA 27	– Formas de onda durante a energização da bobina com as quedas de tensão: (a) Deformação do núcleo do contator, (b) Tensão na bobina e (c) Corrente que circula na bobina.	58
FIGURA 28	– Formas de onda durante as quedas de tensão: (a) Deformação do núcleo do contator, (b) Tensão na bobina, (c) Corrente que circula na bobina.	59
FIGURA 29	– Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator com a queda de tensão.	59
FIGURA 30	– (a) Deformação do núcleo fixo do contator com um obstáculo no entreferro, (b) tensão e corrente através da bobina solenoide.	60
FIGURA 31	– Formas de onda da tensão e da corrente que circula pela bobina do contator com um obstáculo no entreferro.	61
FIGURA 32	– Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator com um obstáculo no entreferro.	61

FIGURA 33 – Espectro em frequência da corrente do contator com um obstáculo no entreferro.	62
FIGURA 34 – (a) Deformação do núcleo fixo do contator sem os anéis de curto-circuito, (b) tensão e corrente através da bobina solenoide.	63
FIGURA 35 – Forma de onda da tensão e da corrente que circula através da bobina do contator sem os anéis de curto-circuito.	63
FIGURA 36 – Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator sem seus anéis de curto-circuito.	64
FIGURA 37 – Espectro em frequência da corrente do contator sem seus anéis de curto-circuito.	64
FIGURA 38 – Fluxograma da simulação da dinâmica do contator: (a) programa principal, (b) rotina de resolução.	66
FIGURA 39 – Comportamento da posição do núcleo móvel.	67
FIGURA 40 – Comportamento da força eletromagnética no núcleo do contator.	67
FIGURA 41 – Esquemático da calibração em temperatura das FBGs	74
FIGURA 42 – Curva da calibração em temperatura dos sensores 1, 2 e 3.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Dimensões do contator WEG CWM500030V26.	45
TABELA 2	– Detalhes do contator WEG CWM500030V26.	46
TABELA 3	– Fatores de abrangência (t)	49
TABELA 4	– Parâmetros mecânicos do contator	65
TABELA 5	– Parâmetros elétricos do contator	66
TABELA 6	– Valores da calibração do sensor 1 de temperatura.	75
TABELA 7	– Valores da calibração do sensor 2 de temperatura.	75
TABELA 8	– Valores da calibração do sensor 3 de temperatura.	75

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> (rede de Bragg em fibra óptica)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
CC	Corrente Contínua
SMFs	<i>Single-mode fibers</i> (Fibras monomodo)
NZDSF	<i>Nonzero dispersion shifted fibers</i> (Fibra de dispersão deslocada não nula)
DCF	<i>Dispersion compensating fiber</i> (Fibra compensadora de dispersão)
CRC	<i>Canadian Communications Research Centre</i> (Centro de Investigação em Telecomunicações do Canadá)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i> (display de cristal líquido)
FC/APC	<i>Ferule Connector/Angled Physical Contact</i> (Conector de Ferrolho/Contato Físico Angulado)

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão nominal fornecida pela fonte de alimentação
ϕ_1	Fluxo magnético gerado pela bobina principal
ϕ_2	Fluxo magnético gerado pelo anel de curto-circuito
r_1	Resistência da bobina
r_2	Resistência do anel de curto-circuito
i_1	Corrente elétrica na bobina solenoide
i_2	Corrente elétrica induzida no anel de curto-circuito
N_1	Número de espiras da bobina principal
N_2	Número de espiras do anel de curto-circuito
\mathfrak{R}_1	Relutância para o núcleo da bobina de excitação
\mathfrak{R}_μ	Relutância externa ao anel de curto-circuito
\mathfrak{R}_2	Relutância interna ao anel de curto-circuito
x	Deslocamento do núcleo móvel
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa do material
e	Diferença entre o entreferro central e lateral
m	Massa do núcleo móvel
F_m	Força eletromagnética
F_p	Peso do núcleo móvel
F_e	Força elástica das molas
k_1	Constante de elasticidade da mola principal de retorno
k_2	Constante de elasticidade da mola dos contatos de força
x_1	Comprimento da mola principal
x_2	Comprimento da mola dos contatos da força
g	Aceleração da gravidade
k_i	Vetor de onda da radiação incidente
K	Vetor de onda
k_f	Vetor de onda da radiação espalhada
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
n_{eff}	Índice de refração efetivo do núcleo
Λ	Periodicidade da rede de Bragg
Δn	Amplitude da perturbação induzida no índice de refração
$R(l, \lambda)$	Refletividade máxima da rede
l	Comprimento da rede de Bragg
Ω	Coefficiente de acoplamento
$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg
ε_z	Deformação aplicada ao longo da fibra
p_e	Constante foto-elástica
p_{11}, p_{12}	Componentes do tensor foto-elástico
ν	Coefficiente de Poisson para a sílica
α	Coefficiente de expansão térmico da fibra óptica

ζ	Coeficiente termo-óptico
Λ_{pm}	Periodicidade da máscara de fase
$u(\bar{x})$	Incerteza padrão da média referente à dispersão das amostras
$s(x_k)$	Desvio padrão
n	Número de medições repetidas para calcular a média
δx	Resolução do equipamento
u_{HBM}	Incerteza sistemática residual do interrogador
$u_{PolyScience}$	Incerteza sistemática residual do banho térmico
u_{c-S1}	Incerteza do Sensor 1
u_{c-S2}	Incerteza do Sensor 2
u_{c-S3}	Incerteza do Sensor 3
$u_{c-Exp-S1}$	Incerteza expandida do Sensor 1
$u_{c-Exp-S2}$	Incerteza expandida do Sensor 2
$u_{c-Exp-S3}$	Incerteza expandida do Sensor 3

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 CONTADORES	22
2.1.1 Classificação dos contadores	22
2.1.2 Componentes de um contator	24
2.1.2.1 Núcleo	24
2.1.2.2 Bobina solenoide	25
2.1.2.3 Contatos	25
2.1.2.4 Molas	25
2.1.3 Modelagem dinâmica do contator	26
2.2 FIBRA ÓPTICA	31
2.2.1 Princípios da fibra óptica	31
2.2.2 Sensores em fibra óptica	32
2.2.3 Redes de Bragg em fibra óptica	33
2.2.3.1 Princípio de funcionamento das FBGs	33
2.2.3.2 Refletividade das redes de Bragg Uniforme	35
2.2.3.3 Sensibilidade das redes de Bragg à temperatura e deformação	36
2.2.3.4 Método de gravação de FBGs	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS DO ARRANJO EXPERIMENTAL	42
3.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	42
3.2 MATERIAIS DO ARRANJO EXPERIMENTAL	43
3.2.1 Contator eletromagnético	43
3.2.2 Interrogador óptico	44
3.2.3 Banho termostático	45
3.3 MÉTODOS DO ARRANJO EXPERIMENTAL	46
3.3.1 Processo de gravação das redes de Bragg em fibra óptica	46
3.3.2 Instalação das FBGs de temperatura	46
3.3.3 Instalação da FBG de deformação	50
3.3.4 Ensaios de temperatura e deformação	50
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO	53
4.1 TEMPERATURA NO NÚCLEO DO CONTATOR	53
4.2 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR SEM FALHA	54
4.3 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR CONSIDERANDO UMA QUEDA DE TENSÃO	57
4.4 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR CONSIDERANDO UM OBSTÁCULO NO ENTREFERRO	60
4.5 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR SEM OS ANÉIS DE CURTO-	

CIRCUITO	62
4.6 SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CONTATOR	65
5 CONCLUSÕES	68
5.1 ATIVIDADES FUTURAS	69
REFERÊNCIAS	70
Apêndice A – CALIBRAÇÃO DAS FBGs DE TEMPERATURA	74
Anexo A – FOLHA DE DADOS DO INTERROGADOR ÓPTICO	77
Anexo B – FOLHA DE DADOS DO BANHO TÉRMICO	78

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos, os elementos de comutação são importantes para isolamento, controle eficiente, sinalização e proteção. Embora os dispositivos de potência eletrônicos de estado sólido sejam cada vez mais utilizados para a comutação de alta velocidade, os dispositivos eletromecânicos comuns, como os contatores, os disjuntores e os relés, são as soluções mais econômicas para as aplicações nas quais se necessita de comutação. Os contatores permitem o controle, centralizado ou remoto, de motores e máquinas industriais. Eles podem ser integrados facilmente a circuitos e executar funções complexas, como automação de fábrica, proteção coordenada e operação dependente do tempo (DJOKIC et al., 2004).

O contator é um dispositivo eletromagnético, que tem capacidade de interromper ou estabelecer a corrente elétrica de uma carga. Pode ser operado remotamente pelo uso de elementos de comando, composto por um circuito de uma bobina, pelo qual uma corrente mais baixa do que a carga circula. Estes elementos têm sido amplamente utilizados na indústria por décadas, e mais de 80% deles são equipados com bobinas de alimentação em corrente alternada (CA) (KANOKBANNAKORN et al., 2011). Milhões deles estão instalados e não podem ser substituídos no futuro próximo por comutadores eletrônicos. Existem razões para isso, como a insensibilidade a picos de tensão na alimentação das bobinas ou a grande capacidade de sobrecarga, o que pode levar à destruição dos comutadores eletrônicos (RIBA et al., 2011).

As perturbações nos sistemas elétricos de distribuição, como as variações de tensão momentâneas, são fenômenos principais que mais afetam os processos industriais. Essas perturbações da tensão ocorrem na rede que alimenta o contator e podem originar problemas que tem como resultado o desligamento ou a reinicialização de motores. Assim, é muito importante fazer uma avaliação das características e dos limites de operação destes equipamentos quando estas perturbações aparecem. Uma destas perturbações é quando se produzem quedas de tensão. Na maior parte dos casos, elas são produzidas por falhas temporárias em sistemas elétricos. A tensão diminui entre 10 % e 90 % do seu valor nominal em frequência nominal durante essas quedas (COLLINS; ZAPARDIEL, 1997). As características principais das quedas de tensão são sua duração e magnitude (DJOKIC; MILANOVI, 2006; DJOKIC et al., 2007).

Os contatores têm a desvantagem do deslocamento mecânico de alguns de seus componentes e do desgaste relacionado a isso. Esse movimento mecânico faz com que os contatos tenham impacto durante o fechamento. A velocidade do núcleo móvel, durante o impacto e fechamento do contato, tem muita importância no funcionamento do dispositivo (CHUNG et al., 2007). Durante o fechamento dos contatos, ocorre um fenômeno de arco elétrico devido ao repique ou efeito ampliado do ricochete dos contatos. Esse arco elétrico produz uma energia que pode causar danos severos, como a erosão dos contatos, em especial quando as cargas podem causar altas correntes de partida, como partidas de motores assíncronos e aplicações de iluminação. Desse modo, são reduzidas a confiabilidade e a vida útil do contator (ESPINOSA et al., 2010).

Algumas pesquisas foram realizadas sobre a operação de contatores em diversas situações de funcionamento. Em Koltermann et al. (1992), é apresentada uma metodologia para a análise dinâmica de contatores, na qual se utiliza o método de elementos finitos para determinar os parâmetros usados em um circuito equivalente. Um simulador que permite a análise de movimentos dinâmicos de contatores e sua comparação com métodos de simulação convencionais são apresentados em Wada et al. (2002). Uma outra abordagem é a modelagem dos parâmetros do contator, para estudar seu comportamento durante quedas de tensão, como pode ser verificado em Kanokbannakorn et al. (2011). Além disso, podem ser encontrados na literatura trabalhos que determinam a posição e a velocidade do núcleo móvel usando os valores de tensão e corrente da bobina do contator como entradas de controle (ESPINOSA et al., 2007).

Para o funcionamento do contator, deve-se aplicar uma corrente elétrica à bobina que produz o aparecimento de uma força de origem magnética que atua principalmente nos entreferros. Essa força faz com que a parte móvel do núcleo se desloque desde seu ponto inicial (estado de repouso) até se juntar com a parte fixa de núcleo, o que acontece quando ambas as partes sofrem um impacto devido à força de origem magnética. Uma forma de medir essa força é através da deformação do núcleo do contator, a qual é proporcional à força eletromagnética presente nele (GHALAMESTANI et al., 2010; SUZUKI; MATSUMOTO, 2005). A medição da deformação no núcleo é complicada, devido ao pouco espaço para inserir sensores no seu interior e fazer medições. Outro problema é a interferência eletromagnética por causa do campo magnético gerado pela bobina do contator. Os sensores ópticos são uma das possibilidades para medições com estes tipos de problemas. Entre eles, se destacam os sensores de deformação e temperatura de redes de Bragg em fibra óptica, devido que apresentam as seguintes vantagens: pequenas dimensões, imunidade a interferência eletromagnética, operação eletricamente passiva e baixa perda (CAZO et al., 2000; PENG et al., 2006; FANG et al., 2016).

Alguns trabalhos anteriores apresentaram medições em temperaturas e deformações com Redes de Bragg em fibra óptica (FBG) em dispositivos eletromagnéticos. Em Sousa et al. (2013), foi apresentada a medição de temperatura de um motor de indução com uma FBG. Foi reportada a incorporação de FBGs para medições de temperatura em geradores de energia em Theune et al. (2002) e Martelli et al. (2012). Em Sousa et al. (2016), foi utilizada a FBG para medição da deformação no estator em um motor de indução, causada pelas vibrações. Em Zhang et al. (2014) foi relatada a utilização de FBGs para medições de temperatura dos enrolamentos, núcleos e barramentos de um transformador de potência imerso em óleo. Outra aplicação de temperatura foi exposta em Wei-gen et al. (2008) no qual foram aplicadas FBGs para medições de temperatura de um transformador de potência. Em Sousa et al. (2017) foram utilizadas FBGs para medição da deformação dinâmica de um estator de motor de indução.

Os sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica possuem muitas vantagens em relação aos sensores elétricos convencionais. Sua capacidade de multiplexação por codificação de comprimento de onda permite que várias FBGs sejam gravadas no mesmo trecho de fibra óptica. Além disso, a combinação de sua capacidade de compatibilidade e multiplexação, permite que as redes Bragg em fibra sejam incorporadas em diversos tipos de materiais para fornecer detecção local de danos. Entretanto, o desenvolvimento de sensores de fibra óptica estruturalmente integrados, usando FBGs, representa um importante aporte para o progresso de estruturas inteligentes (YIN; FRANCIS, 2008; FAN et al., 2007).

Neste contexto, este trabalho aborda o estudo do comportamento do contator eletromagnético em condições de operação normal e com falhas, que permite uma análise mais aprofundada e detalhada do contator. As falhas presentes no contator ou na rede que alimenta a ele, como quedas de tensão e vibrações, podem ser transmitidas aos motores ou outros dispositivos ligados ao mesmo circuito do contator. Por esse motivo, os experimentos práticos têm como finalidade mostrar o comportamento do contator durante as falhas presentes nele. Além disso, objetiva-se fornecer uma base de estudo para trabalhos futuros, que visem possíveis soluções para essas falhas, pois elas são prejudiciais e muitas vezes causam o desligamento do contator em momentos inoportunos da operação do circuito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral determinar, em tempo real, o comportamento dinâmico da deformação e da temperatura no núcleo de um contator eletromagnético, utilizando sensores de rede Bragg em fibra óptica e avaliar esse comportamento durante a operação do contator.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a modelagem das forças magnéticas do núcleo de contator, apresentando as equações características;
- Caracterizar as FBGs em temperatura;
- Avaliar as medições de temperatura e de deformação, obtidas através da instalação das FBGs no contator;
- Analisar os resultados dos ensaios no contator sob condições não ideais de operação;
- Efetuar a simulação da dinâmica do contator, através de seus parâmetros;
- Confrontar a medição de deformação obtida em bancada com a simulação computacional da força eletromagnética.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução do trabalho e os objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo, é descrita a fundamentação teórica sobre contator, onde são descritos o funcionamento, os componentes e a modelagem mecânica dele. Além disso, aborda os principais conceitos e características da rede de Bragg em fibra óptica, como seu princípio de funcionamento, refletividade, sensibilidade e técnicas de gravação.

Os materiais e métodos são descritos no terceiro capítulo, onde na configuração experimental é descrito o funcionamento do experimento prático. Nos materiais, são descritos os componentes principais do experimento, como o contator, o interrogador óptico e o banho

térmico. Por último, nos métodos, são descritos o processo de gravação da FBG e sua instalação no núcleo fixo do contator.

O quarto capítulo apresenta os resultados experimentais e a simulação da dinâmica do contator. Nos resultados experimentais são descritos o comportamento da temperatura no modo energizado do contator. Para os resultados da deformação, considera-se o contator em condição normal de operação e com falhas como quedas de tensão e repiques dos contatos.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões das medições e dos testes realizados, além disso, a proposta de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados as classificações dos contadores, os componentes e a sua modelagem mecânica. Além disso, são abordados as principais características das FBGs como seu funcionamento, refletividade, sensibilidade e sua gravação.

2.1 CONTADORES

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTADORES

O contador é “dispositivo de comutação mecânica tendo apenas uma posição de repouso, operando de outra forma que não seja manualmente, capaz de conduzir, interromper e estabelecer correntes sob condições normais do circuito, incluindo condições de sobrecarga”, de acordo com a norma 2.2.12 da IEC 60947-1. O contador pode ser classificado pelas suas características de construção. Nesta situação, o contador é dividido em (MORAES, 2004):

- **Contadores eletromagnéticos:** quando o acionamento é através de um eletroímã;
- **Contadores eletromecânicos:** são acionados por meios mecânicos como molas, balancins, etc.;
- **Contadores pneumáticos:** é acionada pela pressão de um gás (ar comprimido, nitrogênio, etc.), e;
- **Contadores hidráulicos:** quando o acionamento é pela pressão de um fluido como água, óleo, etc.

Pela disposição de seus contatos pode ser classificado como:

- **Contador a ar:** nele, a separação dos polos é feita no ar e a extinção do arco se dá na câmara de ar;
- **Contador a óleo:** no qual a separação ocorre em uma câmara de óleo, e;

- **Contator a vácuo:** a interrupção é feita em um compartimento com baixa pressão.

Pelo tipo de corrente que passa pela bobina pode ser classificado como:

- **Contator para CA:** são os mais utilizados na atualidade;
- **Contator para CC:** são mais pesados e volumosos que os contadores de CA.

Por último, podem se classificar em:

- **Contadores de baixa tensão:** até 1000 V;
- **Contadores de alta tensão:** a partir de 1000 V.

O funcionamento do contator eletromagnético depende da energização da bobina solenoide (ver Figura 1), a qual gera o fluxo magnético, que se concentra no núcleo fixo. Esse fluxo produzirá uma força eletromagnética no entreferro dos núcleos, que atrairá o núcleo móvel. A velocidade de fechamento depende da força eletromagnética gerada pela bobina e da força elástica da mola de retorno, que atua em sentido oposto ao movimento do núcleo fixo.

A Figura 1 ilustra o estado do contator, está em repouso quando a bobina solenoide não está energizada, nesse caso, os núcleos fixo e móvel, estão separados pela ação da mola principal de retorno, como mostra a Figura 1(a). Uma vez que a bobina é energizada os núcleos fixo e móvel permanecem juntos, como se observa na Figura 1(b).

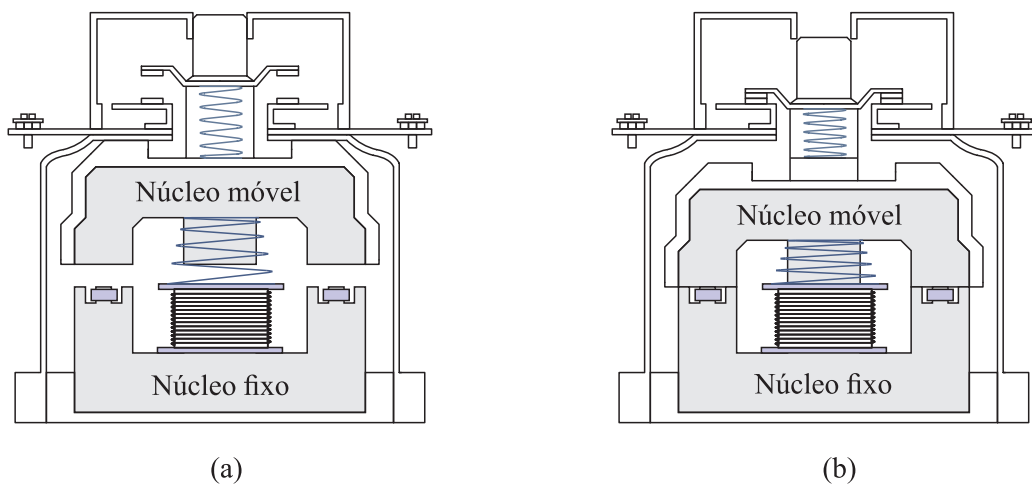


Figura 1: Esquema de estado do contator, (a) em repouso e (b) energizado

Fonte: Adaptado de Riba et al. (2011)

2.1.2 COMPONENTES DE UM CONTATOR

O contator é composto por um núcleo (fixo e móvel), contatos de força, molas de retorno e dos contatos, bobina solenoide e anel de curto-circuito (SANTANA, 2007). A Figura 2 apresenta o esquema geral dos componentes do contator de CA, utilizado no presente trabalho. Nas subseções a seguir são discutidas cada uma dessas partes.

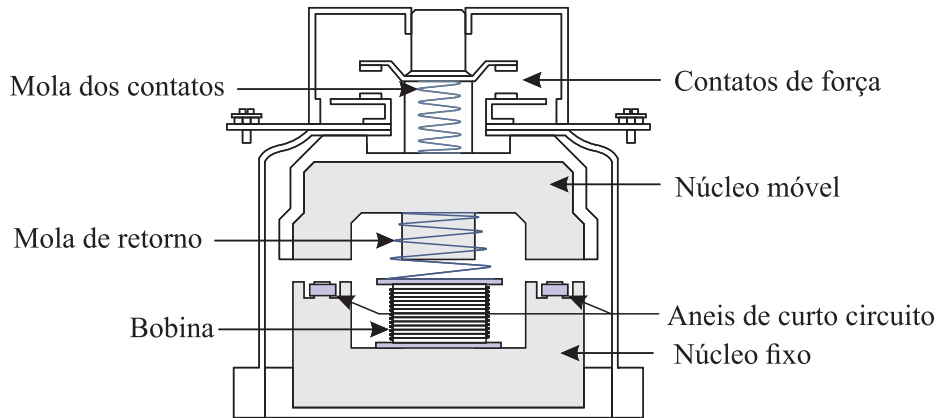


Figura 2: Esquema geral dos componentes do contator de CA.

Fonte: Adaptado de Riba et al. (2011)

2.1.2.1 NÚCLEO

O núcleo do contator é formado por uma parte fixa e uma parte móvel. A parte fixa é feita de material ferromagnético, geralmente em forma de “E” e fixada na carcaça. Sua função é aumentar e concentrar o fluxo magnético gerado pela bobina solenoide, para atrair o núcleo móvel eficientemente. A parte móvel é também construída com o mesmo material do núcleo fixo. Sua função é fechar o circuito magnético quando a bobina solenoide é energizada. Inicialmente está separada do núcleo fixo pela ação da mola de retorno. A separação entre os núcleos denomina-se entreferro.

- Anéis de curto-circuito: a corrente que circula através deles gera um campo magnético defasado com o gerado pela bobina solenoide do contator. Esse tipo de configuração produz uma força que não cai para zero quando se finalizam os semiciclos da forma de onda senoidal da alimentação e, conseqüentemente, elimina as vibrações dos contatos (RIBA et al., 2011).

2.1.2.2 BOBINA SOLENOIDE

A bobina solenoide é composta por fios de cobre, com um grande número de espiras. Quando uma tensão é aplicada a ela, gera um campo magnético superior ao par resistente da mola principal, que tem como função separar os núcleos fixo e móvel, de modo que essas duas partes possam se encontrar. Quando uma bobina solenoide é alimentada com corrente alternada, a intensidade que absorve (denominada corrente de chamada) é relativamente elevada, porque o circuito tem só a resistência dos fios.

Essa corrente elevada gera um campo magnético intenso, de modo que o núcleo fixo possa atrair o núcleo móvel e vencer a resistência mecânica da mola. Uma vez que o circuito magnético é fechado. Quando os núcleos se juntam, aumenta a impedância da bobina e, em consequência, a corrente de chamada se reduz, obtendo assim uma corrente de manutenção ou de trabalho mais baixa.

2.1.2.3 CONTATOS

Os contatos são elementos de material condutor que têm a finalidade de interromper ou estabelecer o passo da corrente através da bobina solenoide, quando essa é energizada. Os contatos são compostos por três elementos: Duas partes fixadas na carcaça e uma parte móvel colocada na armadura, para interromper ou estabelecer o passo da corrente entre as partes fixas. O contato móvel tem uma mola que garante a pressão e a união das três partes.

- **Contatos principais:** sua função é interromper ou estabelecer o circuito principal, facilitando que a corrente se transporte da rede para a carga;
- **Contatos auxiliares:** sua missão específica é interromper ou estabelecer o passo da corrente para os contatores auxiliares ou para os elementos de sinalização, pelas quais estão desenhados para suportar correntes baixas.

2.1.2.4 MOLAS

O contator possui mola principal de retorno e molas de pressão dos contatos do contator. A mola principal de retorno tem como função de permitir uma separação brusca dos núcleos no momento que a bobina solenoide é desenergizada, de modo que o núcleo móvel retorne a sua posição de repouso. As molas dos contatos servem para regular a pressão dos contatos móveis sobre os fixos (MORAES, 2004).

2.1.3 MODELAGEM DINÂMICA DO CONTATOR

Para a modelagem mecânica do contator devem ser determinados um conjunto de equações que representem esse comportamento dinâmico do contator. Esse comportamento ocorre devido à interação dos fenômenos magnéticos, que acontecem no núcleo e anéis de curto-circuito, com os fenômenos elétricos do circuito que alimenta a bobina solenoide, e que induz um campo magnético, junto com efeito mecânico, deslocamento da parte móvel do núcleo, devido à força de origem magnética interagindo com as forças mecânicas das molas do contator.

A Figura 3 apresenta o esquema de dimensões do núcleo do contator, com as áreas das seções transversais e os caminhos l_1 e l_2 utilizados para as análises das relutâncias. Consegue-se distinguir as distâncias dos entreferros central e lateral. Além disso, pode-se observar a localização dos anéis de curto-circuito.

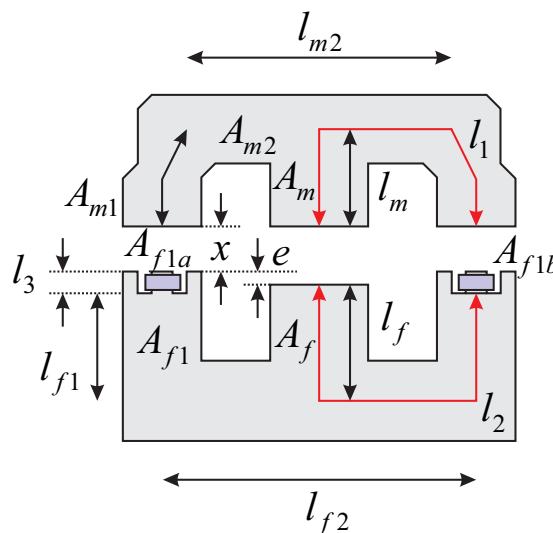


Figura 3: Esquema de dimensões do núcleo do contator.

Fonte: Adaptado de Riba et al. (2008).

Para determinar as equações e analisar o comportamento dinâmico do contator, é necessário realizar uma modelagem matemática dessa dinâmica. Para esse fim, se utiliza uma analogia do circuito magnético com o circuito elétrico equivalente. A Figura 4 ilustra esse circuito magnético equivalente do contator com as relutâncias e os fluxos magnéticos.

A partir do circuito magnético equivalente do contator da Figura 4, e considerando que a bobina do contator está ligada a uma fonte de tensão V , pode-se determinar as Equações elétricas (1) e (2) equivalentes (RUIZ; ESPINOSA, 2008):

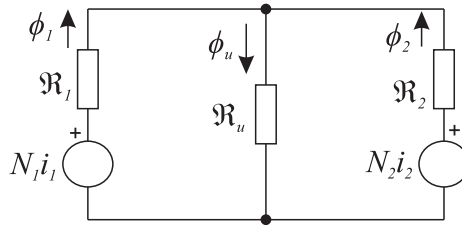


Figura 4: Circuito magnético equivalente do contator.

Fonte: Adaptado de Jeong et al. (2009)

$$V = r_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt}, \quad (1)$$

$$0 = 2r_2 i_2 + N_2 \frac{d\phi_2}{dt}, \quad (2)$$

em que V é a tensão nominal fornecida pela fonte de alimentação, ϕ_1 é o fluxo magnético gerado pela bobina principal, ϕ_2 é o fluxo magnético gerado pelo anel de curto-circuito, r_1 é a resistência da bobina, r_2 é a resistência do anel de curto-circuito, i_1 é a corrente elétrica na bobina solenoide, i_2 é a corrente elétrica induzida no anel de curto-circuito, N_1 é o número de espiras da bobina principal e N_2 é o número de espiras do anel de curto-circuito.

A partir da aplicação da lei de malhas de Kirchhoff, no circuito da Figura 4, obtêm-se as Equações (3) e (4) (JEONG et al., 2009):

$$N_1 i_1 = (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_u) \phi_1 + \mathfrak{R}_u \phi_2, \quad (3)$$

$$N_2 i_2 = \mathfrak{R}_u \phi_1 + (\mathfrak{R}_u + \mathfrak{R}_2) \phi_2, \quad (4)$$

em que \mathfrak{R}_1 é a relutância para o núcleo da bobina de excitação, \mathfrak{R}_u é a relutância externa ao anel de curto-circuito e \mathfrak{R}_2 é a relutância interna ao anel de curto-circuito.

Para determinar as relutâncias do contator mostrado na Figura 4, se faz a análise da metade do contator, para a simplificação dos cálculos. Considere-se que o contator trabalha na sua região linear da curva de saturação. A relutância dos caminhos l_1 , l_2 e do entreferro central, mostradas na Figura 3, é dada pela Equação (5) (JEONG et al., 2009):

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} + \frac{l_{m2}/2}{\mu_0 \mu_r A_{m2}} + \frac{l_{m1}}{\mu_0 \mu_r A_{m1}} + \frac{l_f}{\mu_0 \mu_r A_f} + \frac{l_{f2}/2}{\mu_0 \mu_r A_{f2}} + \frac{l_{f1}}{\mu_0 \mu_r A_{f1}} + \frac{x+e}{\mu_0 A_f}, \quad (5)$$

em que x é o deslocamento do núcleo móvel, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, μ_r é a permeabilidade relativa do material e e é a diferença entre o entreferro central e lateral.

A partir da Figura 3, a relutância interna ao anel de curto-circuito e entreferro central é definido pela Equação (6) (JEONG et al., 2009):

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{l_3}{\mu_0 \mu_r A_{f1a}} + \frac{x}{\mu_0 A_{f1a}}. \quad (6)$$

Enquanto isso, a relutância externa ao anel de curto-circuito e entreferro central pode ser expressado pela Equação (7) (JEONG et al., 2009):

$$\mathfrak{R}_u = \frac{l_3}{\mu_0 \mu_r A_{f1b}} + \frac{x}{\mu_0 A_{f1b}}, \quad (7)$$

Nas equações (5), (6) e (7), podem-se observar que os valores das relutâncias têm uma dependência do valor de x , que são diretamente proporcionais. Quando os núcleos fixo e móvel estão separados, as relutâncias \mathfrak{R}_1 , \mathfrak{R}_2 e \mathfrak{R}_u têm valores muito maiores do que quando estão juntos.

Ao resolver as Equações (3) e (4), e considerado o valor de $N_2 = 1$, pode-se obter os valores dos fluxos em função das correntes a partir da Equação (8) (JEONG et al., 2009):

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_u & \mathfrak{R}_u \\ \mathfrak{R}_u & \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_u \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Desenvolvendo as Equações dadas por (8) com as derivadas dos fluxos que resultam das equações (1) e (2), tem-se a Equação (9) (JEONG et al., 2009):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_1(\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_u)}{N_1^2} & \frac{-2r_2 \mathfrak{R}_u}{N_1} \\ \frac{-r_1 \mathfrak{R}_u}{N_1} & -2r_2(\mathfrak{R}_u + \mathfrak{R}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_u)}{N_1^2} \\ \frac{\mathfrak{R}_u}{N_1} \end{bmatrix} V. \quad (9)$$

Na Figura 5, pode-se observar a força elástica das molas (F_e), força eletromagnética (F_m) e o peso (F_p) que atuam sobre o núcleo móvel. Observa-se que a força elástica das molas está em sentido contrário às somas das forças eletromagnética e peso.

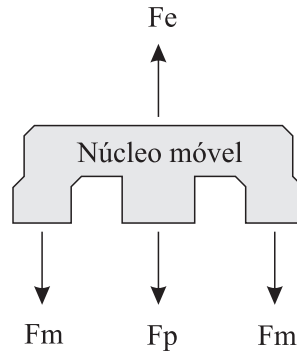


Figura 5: Esquema das forças na parte do núcleo móvel.

Fonte: Autoria própria

Ao considerar a segunda lei de Newton, em que a massa multiplicada pela aceleração é igual à somatória das forças relacionadas na dinâmica do núcleo móvel, e tendo em conta a aceleração e a segunda derivada do deslocamento com relação ao tempo, se tem a Equação (10) (KANOKBANNAKORN et al., 2011):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m}(F_m + F_p - F_e), \quad (10)$$

em que m é a massa do núcleo móvel, F_m é a força eletromagnética, F_p é o peso do núcleo móvel e F_e é a força elástica das molas, principal e de contatos de força.

A força eletromagnética pode ser calculada desenvolvendo a diferenciação parcial da energia magnética armazenada pelo sistema, com a Equação (11) (RUIZ et al., 2010):

$$F_m = F_m(\phi, x) = -\frac{\partial W_m(\phi, x)}{\partial x}. \quad (11)$$

A energia armazenada pelo sistema, que depende das relutâncias e dos fluxos magnéticos, pode se expressar pela Equação (12) (JEONG et al., 2009):

$$W_m(\phi, x) = \frac{1}{2}(\mathfrak{R}_1(x) + \mathfrak{R}_u(x))\phi_1^2 + \mathfrak{R}_u(x)\phi_1\phi_2 + \frac{1}{2}(\mathfrak{R}_2(x) + \mathfrak{R}_u(x))\phi_2^2. \quad (12)$$

A força eletromagnética pode ser obtida derivando a energia armazenada em função à

posição do núcleo móvel, resultando na Equação (13) (RUIZ et al., 2010):

$$F_m = \frac{\phi_1^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{A_f} + \frac{1}{A_{f1b}} \right) + \frac{\phi_1 \phi_2}{\mu_0 A_{f1b}} + \frac{\phi_2^2}{2\mu_0} \left(\frac{1}{A_{f1a}} + \frac{1}{A_{f1b}} \right). \quad (13)$$

A Figura 6 ilustra o diagrama de disposição das molas, onde observa-se o deslocamento máximo do núcleo móvel e a diferença dos entreferrós central e lateral. A mola principal de retorno atua todo o tempo, mas a mola desses contatos só atua quando o núcleo móvel se junta ao núcleo fixo.

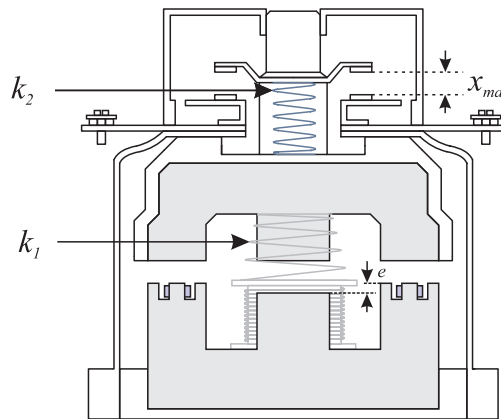


Figura 6: Diagrama de disposição das molas.

Ao se considerar que a força contrária ao movimento das molas seja linear e modelada de acordo com a lei de Hooke, a mola principal de retorno atua quando o núcleo móvel se move, enquanto as molas dos contatos de força atuam quando o núcleo móvel faz contato com o núcleo fixo. A força gerada pela mola principal de retorno e dos contatos de força é dada pela Equação (14) (KANOKBANNAKORN et al., 2011):

$$F_e = \begin{cases} k_1(x_1 - x) + k_2(x_2 - x), & 0 \leq x \leq x_c \\ k_1(x_1 - x), & x_c \leq x \leq x_{max}, \end{cases} \quad (14)$$

em que k_1 é a constante de elasticidade da mola principal de retorno, k_2 é a constante de elasticidade das molas dos contatos de força, x_1 é o comprimento da mola principal e x_2 é o comprimento das molas dos contatos da força.

O peso do núcleo móvel pode ser expressado como (15) (PEDRA et al., 2002):

$$F_p = mg, \quad (15)$$

em que g é a aceleração da gravidade ($g = 9,8m/s^2$) e m é a massa do núcleo móvel do contator.

2.2 FIBRA ÓPTICA

2.2.1 PRINCÍPIOS DA FIBRA ÓPTICA

O crescimento contínuo do tráfego de dados nas redes de comunicações ópticas em todo o mundo, fomenta a pesquisa para permitir maior capacidade e transmissão de dados num sistema de comunicação óptica. A luz é um dos componentes principais desse sistema que é utilizada como portadora de informação. Nos sistemas de comunicações com fibra óptica utilizam fibras de vidro ou de plástico para conter as ondas de luz e guiá-las como as ondas eletromagnéticas são guiadas por um guia de ondas (TOMASI, 2003; DOWNIE et al., 2017).

Nas últimas décadas do século XX, foram desenvolvidas variedades de fibras ópticas para sua utilização em sistemas de comunicações ópticas, com o fim de lidar com a crescente distância de transmissão, taxa de dados e largura de banda. Uma fibra óptica convencional consiste de um núcleo de vidro sólido com maior índice de refração envolto por um revestimento com um índice de refração menor. As três principais fibras ópticas de transmissão são: fibras monomodo (SMFs), fibra de dispersão deslocada não nula (NZDSF) e fibra compensadora de dispersão (DCF). Além dessas fibras ópticas de transmissão, também foram desenvolvidas fibras ópticas especiais para dispositivos ópticos como fibras ópticas fotossensíveis, fibras ópticas dopadas com terras raras, fibras ópticas de manutenção da polarização e fibra óptica de atenuação (OH et al., 2005).

O material usado com mais frequência nas fibras ópticas de telecomunicações, é o vidro de sílica dopada com germania que é utilizada mais de 30 anos, devido às excelentes propriedades físicas desse vidro. Primeiro, o vidro de sílica dopada com germania tem alta resistência mecânica, baixa sensibilidade a radiação ionizante e baixa atividade química. Essas propriedades permitem fabricar fibras ópticas de longa vida útil em diferentes ambientes e de boa qualidade geométrica. Segundo, esse vidro possui baixa absorção intrínseca e espalhamento Rayleigh na faixa espectral do infravermelho. Um nível típico de perda, para um comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$, de menos de $0,20 \text{ dB/km}$ permite um incremento da distância entre os amplificadores de até 100 km. Terceiro, o vidro de sílica dopada com germania possui características ópticas não lineares baixas para que sinais ópticos com potência baixa, como por exemplo de 1 W, possam se propagar sem distorção linear considerável por um fibra monomodo (DIANOV; MASHINSKY, 2005).

2.2.2 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

As características de propagação da luz são afetadas pelas condições físicas encontradas. Por conseguinte, as fibras ópticas podem ser utilizadas para detectar de duas maneiras distintas os efeitos ambientais. Na Figura 7, pode-se observar esses métodos, sensoriamento extrínseco e intrínseco (UDD; JR, 2011).

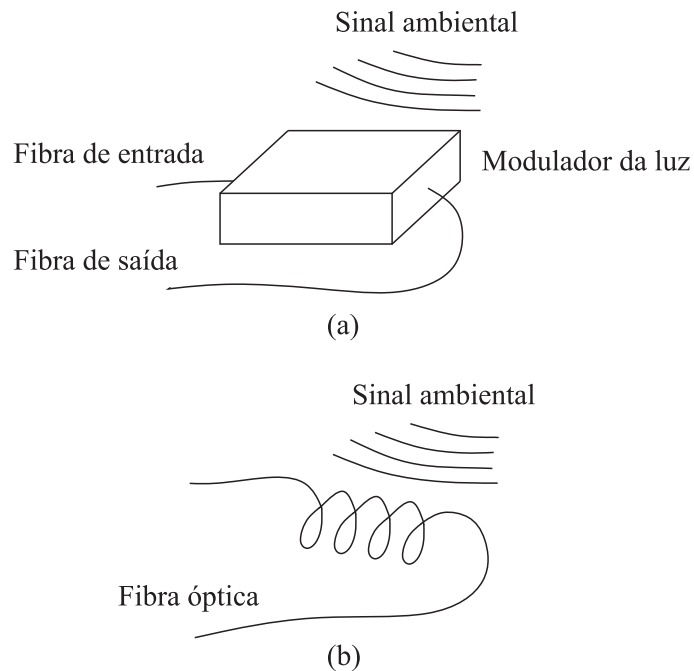


Figura 7: Métodos de sensoriamento: (a) extrínsecos; (b) intrínsecos.

Fonte: Adaptado de Yin e Francis (2008)

No método de sensoriamento extrínseco, a fibra simplesmente guia a luz para outro meio. Nesse caso a fibra transporta a luz para o meio de sensoriamento, dentro do qual é modulada. Em seguida, ela é coletada pela mesma fibra ou por outra diferente, após ter sido modulada pelo parâmetro de interesse e retornada a um local remoto para seu processamento (CULSHAW; KERSEY, 2008). O elemento sensor pode transportar a potência óptica; sendo essa transformada em eletricidade. Alimentaria a um sensor elétrico, de modo que, eliminaria a utilização de cabos elétricos.

Para o método de sensoriamento intrínseco, os sensores intrínsecos mantêm a luz em todo seu recorrido, de maneira que o parâmetro externo de interesse modula a luz à medida que essa se propaga através da fibra. O benefício disto é que são removidas as interfaces entre a fibra e a zona de modulação. Uma restrição seria de que podem ser monitoradas apenas as interações que influenciam a luz que passa através da fibra. Essas interações podem incluir perda óptica, atraso óptico e atraso diferencial (CULSHAW; KERSEY, 2008).

2.2.3 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Em 1978 foi observada por Ken Hill e colaboradores, no Centro de Investigação em Telecomunicações do Canadá (CRC do inglês Canadian Communications Research Centre), a formação de redes permanentes em uma fibra óptica. Eles lançaram, em uma fibra dopada com germânia, uma intensa radiação laser de argônio de 488 nm e observaram, após algum tempo, que se incrementou a intensidade da luz refletida. Gerald Meltz e seus colegas, em 1989, descobriram uma técnica transversal de inscrição, onde a iluminação a laser veio do lado da fibra. Essa técnica utiliza o padrão de interferência da luz laser ultravioleta para criar a estrutura periódica da rede de Bragg em fibra (HILL; MELTZ, 1997; OTHONOS, 1997).

2.2.3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS FBGs

A Figura 8 ilustra corte longitudinal de uma fibra óptica com uma FBG inscrita no seu interior: o núcleo, que tem o maior índice de refração e por onde se propaga a luz, a casca, que cobre o núcleo (fabricada com sílica de menor índice de refração) e o revestimento que serve para aumentar a resistência mecânica da fibra óptica.

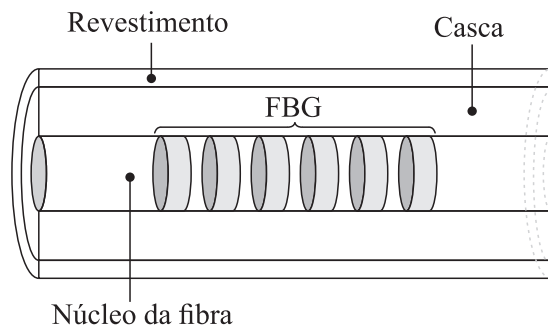


Figura 8: Diagrama dos componentes de uma fibra óptica com sensor FBG.

Fonte: Adaptado de Yan et al. (2019)

A FBG é uma modulação periódica do índice de refração no núcleo da fibra óptica ao longo do seu comprimento, gravada em um segmento curto dessa fibra, que reflete determinados comprimentos de onda da luz e transmite todos os outros. Isso se consegue através da criação de uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra. A alteração na estrutura de uma FBG é devido a perturbações externas como deformação, temperatura ou pressão que alteram suas características espectrais (OTHONOS, 1999). Uma FBG, pode ser usada como um filtro óptico embutido para bloquear certos comprimentos de onda, ou como um refletor específico de comprimento de onda (HILL; MELTZ, 1997).

A Figura 9 ilustra o princípio de funcionamento de uma FBG com os espectros de luz. A Figura 9(a) ilustra a FBG, com sua periodicidade (Λ) e sua largura (l), sendo iluminada por uma fonte de luz, onde parte dessa luz é transmitida e a outra dela é refletida. Os espectros da luz incidente, com banda larga de comprimento de onda, da luz refletida com uma faixa estreita do espectro de luz centrada num comprimento de onda específico, denominado comprimento de onda de Bragg (λ_B) e da luz transmitida são mostrados na Figura 9(b).

Devido ao fenômeno da interferência da luz, sucede a reflexão seletiva. A fonte de luz, ao atingir a primeira superfície da rede de Bragg, sofre reflexão e transmissão. Uma parte dessa fonte atinge a segunda superfície, onde novamente, sofre reflexão e transmissão e assim consecutivamente. A fonte de luz refletida pelas superfícies sofre interferência construtiva, criando uma banda refletida centrada em um determinado comprimento de onda.

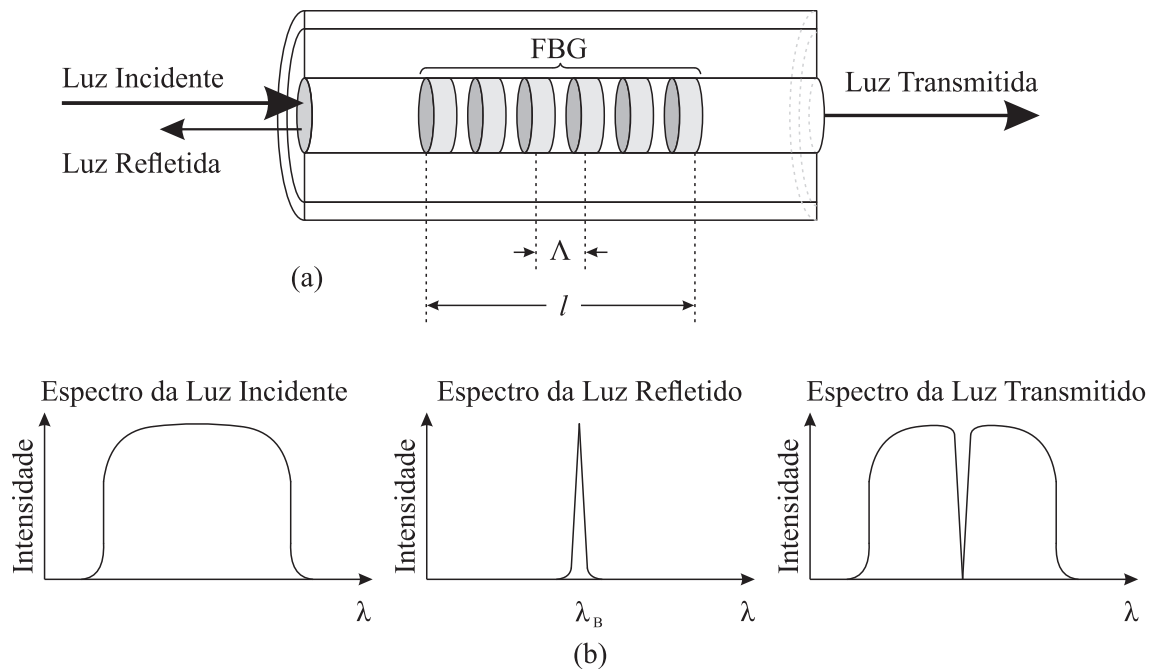


Figura 9: Princípio funcionamento de uma FBG: (a) a estrutura da FBG, (b) espectros da luz incidente, refletido e transmitido

Fonte: Adaptado de Hong et al. (2019)

A condição necessária da rede de Bragg é que sejam satisfeitas as condições de energia e de momento. A expressão da energia do fóton é dada por $E = hf$, em que h é a constante de Plank. Desse modo, a frequência da luz incidente deve ser a mesma da luz refletida ($hf_i = hf_f$) para que suceda a conservação de energia. Por outro lado, a conservação de momento demanda que o vetor de onda da radiação incidente (k_i), mais o vetor de onda da rede (K), seja igual ao vetor de onda da radiação espalhada (k_f), como mostra a Equação (16) (OTHONOS, 1997):

$$k_i + K = k_f, \quad (16)$$

onde o vetor de onda (K) tem uma magnitude $2\pi/\Lambda$ em direção normal aos planos das redes. Os vetores das ondas da radiação, incidente e difratado, são iguais em magnitude, mas opostos em direção. Por conseguinte, a condição da conservação do momento pode-se reescrever como (17):

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (17)$$

que, simplificado, resulta na equação que descreve o comprimento de onda da reflexão de uma rede de Bragg (λ_B), e pode ser escrita pela Equação (18) (BAI et al., 2019):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (18)$$

em que n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo e Λ é a periodicidade da FBG. Os valores de n_{eff} e Λ variam com um estímulo externo, de deformação ou de temperatura, que a FBG pode receber e em consequência, variar o comprimento de onda λ_B . Porém, a FBG poderá atuar como um elemento que mede algum estímulo que altere n_{eff} ou λ_B , como a deformação, a temperatura, a aceleração ou a pressão. Esses estímulos irão alterar o comprimento de onda λ_B e irão fornecer as intensidades desses estímulos, sendo esses monitorados (CAZO et al., 2000).

2.2.3.2 REFLETIVIDADE DAS REDES DE BRAGG UNIFORME

Para uma FBG, dentro de um núcleo de uma fibra óptica com um índice de refração n_0 , o perfil do índice de refração pode ser definido pela Equação (19) (OTHONOS, 1997):

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right), \quad (19)$$

em que Δn é a amplitude da perturbação induzida no índice de refração (com valores típicos de 10^{-5} a 10^{-2}), z é a distância longitudinal do eixo ao longo da fibra óptica e Λ é o período da FBG.

Ao considerar que a luz incide em $z = 0$ e que não há luz incidente na parte de trás da rede, a refletividade de uma FBG, com período de modulação e amplitude constantes, pode ser representada pela Equação (20) (OTHONOS, 1997):

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}, \quad (20)$$

em que $R(l, \lambda)$ é a refletividade máxima da rede, l é o Comprimento da rede, Ω é o coeficiente de acoplamento, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ é a variação do vetor de onda, $k = 2\pi n_0/\lambda$ é a constante de propagação e $s = \sqrt{\Omega^2 - \Delta k^2}$. O coeficiente de acoplamento (Ω), para uma variação senoidal do índice de refração ao longo do eixo da fibra óptica, pode ser escrito como:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}, \quad (21)$$

em que $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$, $V \geq 2,4$. η está em função do parâmetro V da fibra, que é a fração da intensidade, de modo que está contida no núcleo da fibra óptica. Quando $\Delta k = 0$, a refletividade pode ser expressa como (OTHONOS, 1997):

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l). \quad (22)$$

Como a refletividade está em função do índice de refração e do comprimento da rede, ela aumentará à medida que o índice de refração induzido aumenta. Da mesma forma, à medida que o comprimento da rede aumenta, também aumentará a refletividade resultante. Uma expressão geral, na metade da largura de banda máxima de uma rede, para a largura total aproximada, pode ser expressa por (23) (OTHONOS, 1997):

$$\Delta \lambda = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (23)$$

em que N é o número dos planos da rede, o parâmetro $\alpha \sim 1$ para redes fortes (para redes muito próximas a 100% de refletividade) e $\alpha \sim 0,5$ para redes fracas.

2.2.3.3 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO

As FBGs possuem sensibilidade a variações de temperatura e deformação simultaneamente. Essa característica é conhecida como sensibilidade cruzada (NETO, 2018). Como exemplo, a FBG medirá a deformação quando a fibra é comprimida ou tracionada. Isso ocorre porque uma variação no período da microestrutura e uma alteração da constante foto-elástica da fibra são ocasionadas pela deformação, e, como resultado, a variação do comprimento de onda de Bragg.

A Equação (24) define a variação de comprimento de onda de Bragg devido à deformação longitudinal e à variação de temperatura de uma FBG, pode ser expressa como (OTHONOS, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (24)$$

em que l é o comprimento da FBG, T a temperatura e $\Delta\lambda_B$ é a variação do comprimento de onda de Bragg. O termo $\partial n_{eff}/\partial l$ reflete as propriedades foto-elásticas da fibra óptica (mudança de índice de refração devido às variações na deformação). Por outro lado o termo $\partial n_{eff}/\partial T$ reflete o efeito da temperatura (variação de índice de refração induzido por efeitos da temperatura). Os termos $\partial \Lambda/\partial l$ e $\partial \Lambda/\partial T$ refletem deformações mecânicas e térmicas da sílica, à deformação e à temperatura, respectivamente. Desse modo pode-se determinar que perturbações térmicas e mecânicas resultam numa variação em $\Delta\lambda_B$, não distinguindo qual a contribuição de cada efeito sobre a FBG. Uma forma de resolver esse problema de sensibilidade cruzada é utilizar duas FBGs diferentes, em que uma delas está sujeita a deformação e temperatura e a outra é isolada de variações de deformação e experimenta somente a temperatura.

O primeiro termo da Equação (24), representa a dependência que tem a variação de comprimento de onda de Bragg com a variação da deformação. Isso equivale a uma mudança na periodicidade da rede de Bragg e à variação induzida pela deformação no índice de refração. Esse primeiro termo pode ser reescrito como (OTHONOS, 1997):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z, \quad (25)$$

em que ε_z é a deformação aplicada ao longo da fibra e p_e representa a constante foto-elástica efetiva, que pode ser expressa como (FENG; JIANG, 2019):

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (26)$$

em que p_{11} , p_{12} são os componentes do tensor foto-elástico e ν é o coeficiente de Poisson para a sílica. Considere-se $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ e $n_{eff} = 1,482$, para uma fibra óptica dopada com germânio (OTHONOS, 1997). Utilizando esses valores e $\varepsilon_z = 1 \mu m$, resulta em uma sensibilidade de $1,22 pm/\mu strain$ num comprimento de onda de 1550 nm.

O segundo termo da Equação (24) apresenta que a variação do comprimento de onda de Bragg tem uma dependência da variação da temperatura. Esse termo pode ser representado

pela Equação (27) (AHMADI et al., 2018):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (27)$$

em que $\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica ($\sim 0,55 \times 10^{-6}$ para a sílica (FANG et al., 2012; LI et al., 2018)), $\zeta = (1/n)(\partial n/\partial T)$ representa o coeficiente termo-óptico e tem um valor de $8,6 \times 10^{-6}$ (OTHONOS, 1997). Pode-se observar que a mudança do índice é o efeito dominante. A sensibilidade esperada em uma rede de Bragg de 1550 nm é de aproximadamente 13,25 pm/°C.

A Figura 10 ilustra o princípio de funcionamento de uma FBG sujeito a uma mudança na deformação. Na Figura 10(a) apresenta a FBG quando é tracionado e as direções da luz incidente, refletida e transmitida. A Figura 10(b) mostra os espectros da luz incidente, refletida e transmitida. Quando a FBG é tracionada o comprimento de onda de Bragg (λ_B) se desloca em direção à direita, mas, quando deixa de ser tracionada, volta para sua posição inicial. Contrariamente, se a FBG é comprimida o comprimento de onda de Bragg (λ_B) se desloca em direção à esquerda.

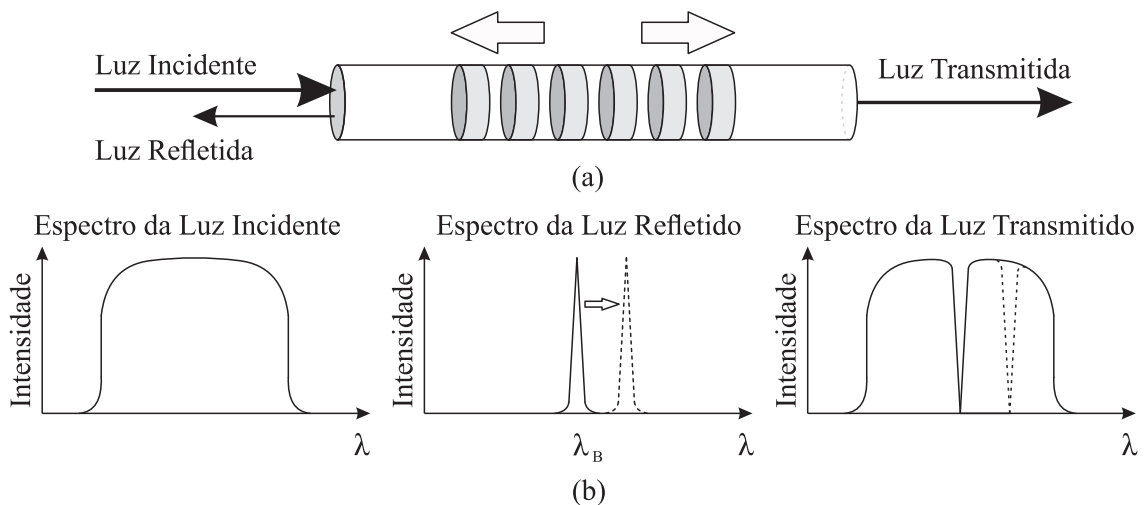


Figura 10: Princípio de funcionamento de uma FBG: (a) a FBG sujeito a uma mudança na deformação, (b) espectros da luz incidente, refletido e transmitido

Fonte: Adaptado de Hong et al. (2019)

Efeitos das mudanças de temperatura nas propriedades das fibras compreendem o efeito termo-óptico e a expansão térmica (FANG et al., 2012). A Figura 11(a) ilustra o princípio de funcionamento de uma FBG sujeito a uma mudança de temperatura, com as direções da luz incidente, da luz refletida e da luz transmitida. Na Figura 11(b) se observa os espectros da luz incidente, refletida e transmitida. Quando a FBG estiver sujeito a um aumento de temperatura,

o comprimento de onda da reflexão (λ_B) irá se mover para a direita, mas quando a FBG deixa de se aquecer, λ_B voltará a sua posição inicial. De maneira oposta, se a FBG estiver sujeito a uma diminuição de temperatura o λ_B irá se mover em direção à esquerda no espectro de luz.

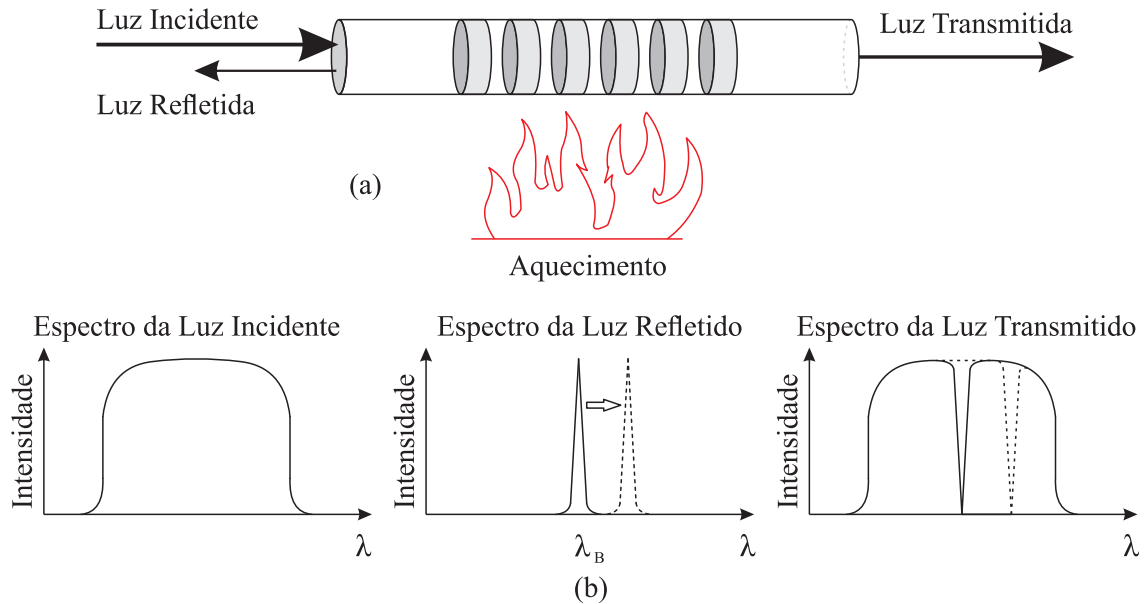


Figura 11: Princípio de funcionamento de uma FBG: (a) a FBG sujeito a uma mudança à temperatura, (b) espectros da luz incidente, refletida e transmitida.

Fonte: Adaptado de Hong et al. (2019)

2.2.3.4 MÉTODO DE GRAVAÇÃO DE FBGs

Uma das técnicas aplicadas nas produção de FBGs mais práticas e eficientes é a técnica interferométrica baseada na iluminação direta sobre uma máscara de fase que modula a amplitude da luz incidente. Essa técnica utiliza uma máscara de fase como elemento de difração óptica, para modular espacialmente o feixe de escrita UV, como se pode observar na Figura 12. As máscaras de fase podem se formar holograficamente ou por litografia de feixe de elétrons.

A máscara de fase é construída em uma superfície plana, feita geralmente de sílica fundida de alta qualidade. A FBG inscrita na fibra, por efeito da interferência do feixe UV com a máscara de fase, tem uma periodicidade que pode ser expressa por (OLIVEIRA, 2009):

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2}, \quad (28)$$

em que Λ_{pm} é a periodicidade da máscara de fase. Substituindo a expressão (28) em (18), pode-se definir o λ_B em função da periodicidade da máscara de fase pela Equação (29):

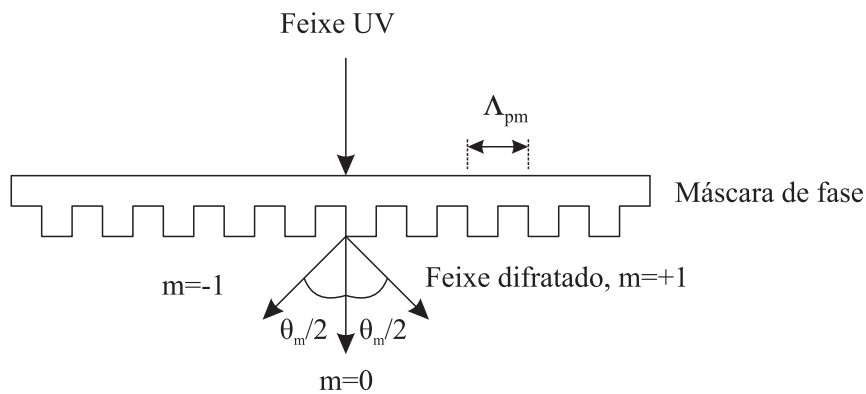


Figura 12: Esquema de incidência do feixe difratado nas ordens $m \pm 1$ e $m=0$.

Fonte: Adaptado de Kashyap (2009)

$$\lambda_B = n_{eff} \Lambda_{pm}. \quad (29)$$

Essa técnica de gravação da FBG no núcleo de uma fibra óptica fotossensível é do tipo externa. Para efetuar a inscrição pelo método de iluminação em direção normal a máscara de fase, a fibra óptica é colocada junto a máscara de fase. Posteriormente, o feixe UV é iluminado sob a máscara de fase e, em consequência, difratada e separada nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$, que geram um padrão de modulação do índice de refração no núcleo da fibra óptica. A Figura 13 mostra o esquema de gravação de uma FBG pela técnica com máscara de fase.

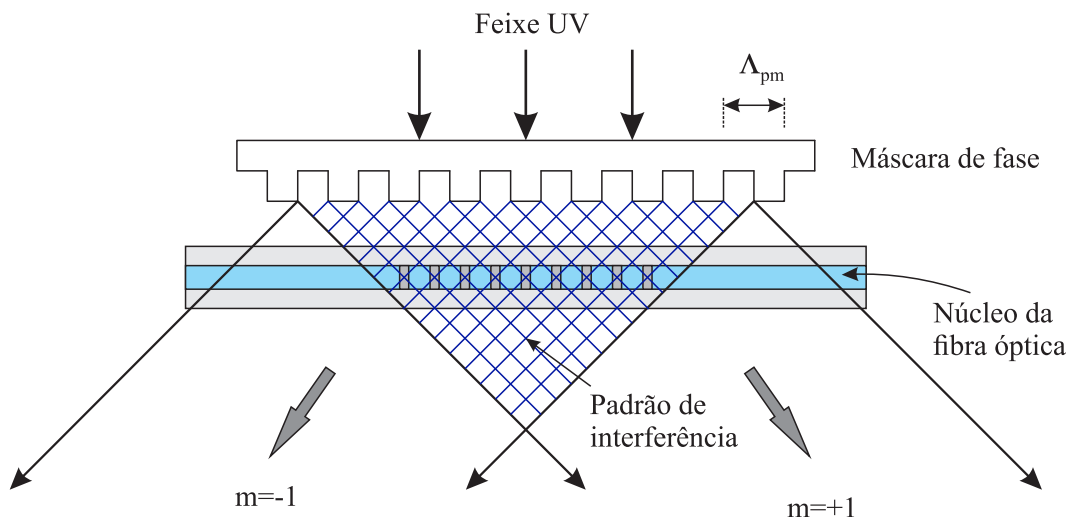


Figura 13: Esquema de gravação de uma FBG pela técnica máscara de fase.

Fonte: Adaptado de Pedroso (2018)

A máscara de fase tem a vantagem de reduzir a complexidade de fabricação de FBGs, devido ao uso de apenas um elemento óptico. A sensibilidade às vibrações mecânicas são reduzidas, por motivo de que a fibra é colocada geralmente atrás da máscara de fase no campo próximo dos feixes UV difrativos. Uma desvantagem dessa técnica seria que é necessário uma máscara de fase para cada comprimento de onda (OTHONOS, 1997; OLIVEIRA, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Nesse capítulo é apresentada a configuração experimental do trabalho, onde se ilustra o esquema geral de aquisição de dados. Além disso, são descritos os principais componentes do experimento prático e por último são abordados os métodos, nos quais são detalhados o processo de gravação, a instalação dos sensores de temperatura e de deformação e os respectivos ensaios.

3.1 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Para obter os resultados da deformação e da temperatura no núcleo do contator, foi montado, no Laboratório integrado de Análise e Processamento de Energia da UTFPR Câmpus Pato Branco, a configuração experimental da Figura 14. O experimento prático é composto por três partes principais: o computador para aquisição de dados, o interrogador óptico para leitura dos sensores e o contator eletromagnético contendo os sensores. A conexão entre o computador e o interrogador óptico é mediante um cabo *Ethernet* e a conexão dos sensores com o interrogador óptico é feita por meio de cabos de fibra óptica.

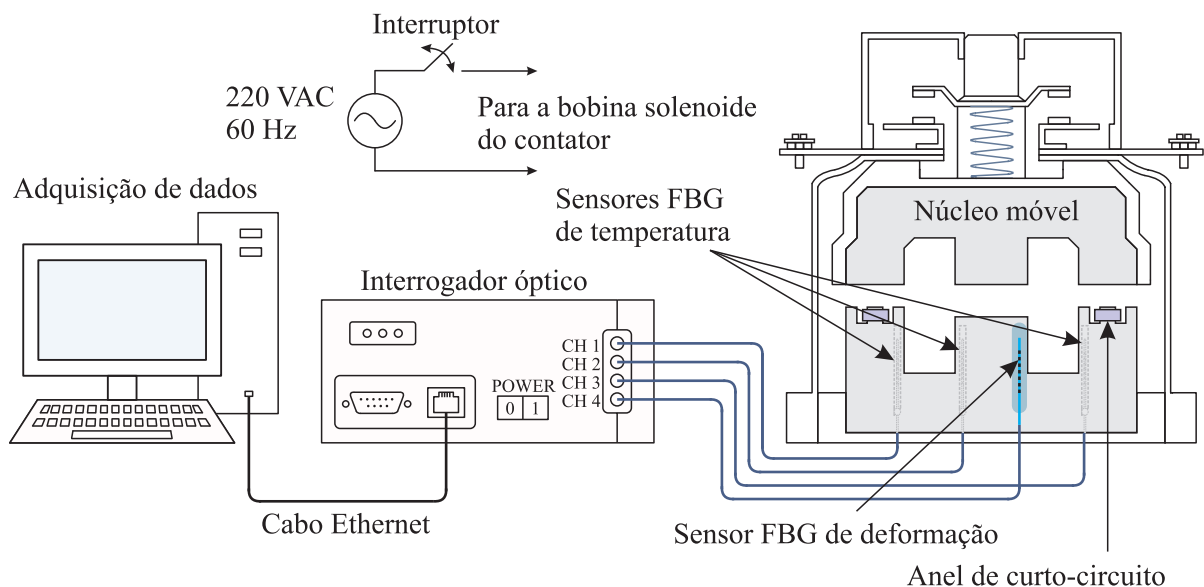


Figura 14: Esquema de aquisição de dados

Para a medição da temperatura foram utilizados três FBGs com comprimentos de onda de Bragg de $\lambda_{B1} = 1543,29$ nm, $\lambda_{B1} = 1539,70$ nm e $\lambda_{B1} = 1539,88$ nm. A taxa de amostragem utilizada no interrogador óptico foi de 5 Hz. O teste experimental consiste em energizar a bobina do contator por três horas, aproximadamente, em um ambiente controlado e, após esse tempo, desenergizar essa bobina.

No caso das medições da deformação, foi utilizado uma FBG com um comprimento de onda de Bragg de $\lambda_{B1} = 1539,96$ nm e o interrogador óptico com sua máxima taxa de amostragem que é 1 kHz. Os testes experimentais consistem em energizar e desenergizar a bobina solenoide do contator e três situações diferentes podem ser analisadas. A primeira é o transiente durante a energização da bobina. Depois disso, é apresentado um regime permanente de deformação, causado pela força eletromagnética. A última situação é o transiente quando a bobina é desenergizada. Para o desenvolvimento da aquisição de dados, foram utilizados os seguintes equipamentos: o contator eletromagnético, o interrogador óptico e o banho térmico, as quais serão detalhadas abaixo.

3.2 MATERIAIS DO ARRANJO EXPERIMENTAL

3.2.1 CONTATOR ELETROMAGNÉTICO

O contator utilizado no presente trabalho é do fabricante WEG, modelo CWM500030V26, tem uma tensão de alimentação nas bobinas de 220 V a 60 Hz e 190 V a 50 Hz (WEG, 2019), com capacidade de corrente de 50 A. Esse contator foi escolhido, por ser amplamente utilizado na indústria brasileira e pela facilidade na manipulação das FBGs no seu núcleo. Para a alimentação da bobina do contator, utilizou-se de uma tomada (no Paraná monofásico 127 V e bifásico 220 V) em 220 V e 60 Hz no Laboratório. A Figura 15 ilustra o contator utilizado.

A Figura 16 ilustra os componentes internos principais do contator mostrado na Figura 15, onde pode-se observar os contatos de força, os núcleos móvel e fixo, com seus anéis de curto-circuito, a bobina solenoide, a mola principal de retorno e as molas dos contatos de força.

O esquema de dimensões dos núcleos fixo e móvel pode ser observado na Figura 3, na qual se ilustra as larguras e as áreas das partes do núcleo. As larguras foram obtidas mediante a medição direta no núcleo do contator com um paquímetro em metal 6". Já as áreas foram obtidas multiplicando a largura com a profundidade, como pode se observar na Tabela 1.



Figura 15: Contator eletromagnético WEG CWM500030V26.

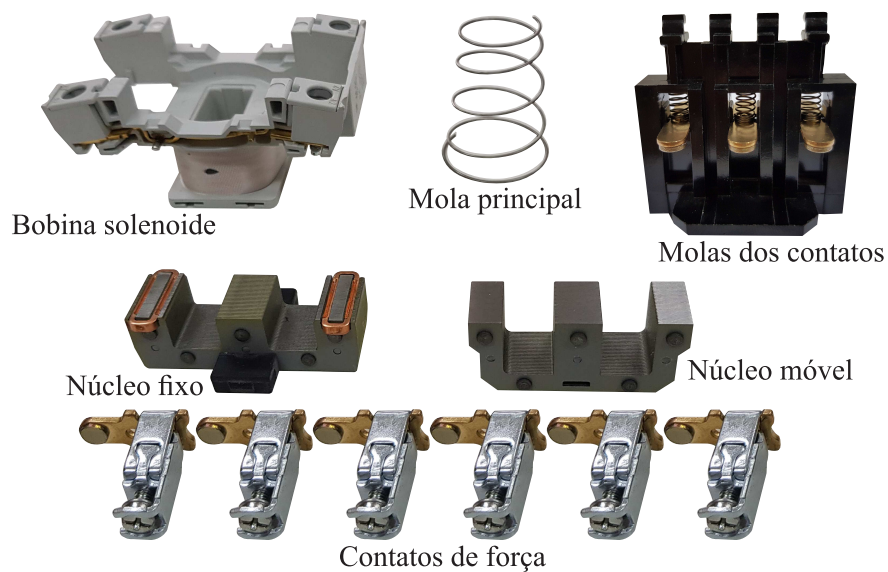


Figura 16: Componentes do contator WEG CWM500030V26.

Na Tabela 2, podem se observar as características técnicas elétricas e mecânicas do contator eletromagnético utilizado no presente trabalho.

3.2.2 INTERROGADOR ÓPTICO

O interrogador óptico utilizado é do fabricante HBM, modelo DI410. Tal interrogador óptico é utilizado especificamente para medições dinâmicas como deformação, temperatura e pressão, com uma faixa de medição de 1510 a 1590 nm. O interrogador tem quatro canais com uma taxa de amostragem variável de 5 até 1000 Hz. As configurações e a aquisição de dados são

Tabela 1: Dimensões do contator WEG CWM500030V26.

Característica	Valor
<i>Am</i>	310 mm ²
<i>Am1</i>	200 mm ²
<i>Am2</i>	200 mm ²
<i>Af</i>	320 mm ²
<i>Af1</i>	220 mm ²
<i>Af2</i>	220 mm ²
<i>Af1a</i>	94 mm ²
<i>Af1b</i>	22 mm ²
<i>l1</i>	53,57 mm
<i>l2</i>	73,80 mm
<i>l3</i>	3,20 mm
<i>p</i>	20,00 mm
<i>lm</i>	15,00 mm
<i>lm2</i>	44,34 mm
<i>lf</i>	24,75 mm
<i>lf1</i>	21,55 mm
<i>lf2</i>	55,00 mm

feitas por meio do programa *Catman Easy/AP* (HBM, 2019). O funcionamento do interrogador se resume em que uma fonte de luz que ilumina continuamente os cordões de fibra conectados em seus canais, distinguindo o valor do comprimento de onda de *Bragg* em cada tempo de amostragem. Esses valores são mostrados em gráficos por intermédio do programa *Catman Easy/AP*. No ANEXO A pode-se observar as principais características técnicas do interrogador óptico.

3.2.3 BANHO TERMOSTÁTICO

O banho termostático é da marca *PolyScience*, modelo 9002A11B, e é composto por um controlador de temperatura que comanda o sistema de refrigeração/aquecimento. O controlador de temperatura tem uma tela LCD em que se observa o *set point* e a temperatura atual do fluido dentro do banho termostático. Também é composto por uma bomba de sucção/pressão de velocidade variável, comandada pelo controlador de temperatura. Esse banho térmico é utilizado para a calibração em temperatura das FBGs. Os detalhes podem se observar no ANEXO B.

Tabela 2: Detalhes do contator WEG CWM500030V26.

Característica	Valor	Unidade
Tensão nominal de isolamento U_i - IEC 60974-4-1	1000	V
Tensão nominal de isolamento U_i - UL, CSA	600	V
Limite mínimo de frequência	25	Hz
Limite máximo de frequência	400	Hz
Vida mecânica CA	10	milhões
Vida mecânica CC	10	milhões
Vida Elétrica - Ie AC-3	1,1	milhões
Grau de proteção (IEC 60529) - Terminais principais	IP10	
Grau de proteção (IEC 60529) - Bobina e contatos auxiliares	IP20	
Corrente nominal I_n - AC-3 ($U_e \leq 440$ V)	50	A
Corrente nominal I_n - AC-4	23	A
Corrente nominal de emprego I_e - AC-1 ($\eta = 55$ °C)	90	A
Tensão nominal de emprego U_e - UL, CSA	600	V
Fechamento dos contatos NA	15..30	ms
Abertura dos contatos NA	9..15	ms
Altura	116,5	mm
Largura	66	mm
Profundidade	116	mm
Peso bruto	1,18	kg

Fonte: (WEG, 2019)

3.3 MÉTODOS DO ARRANJO EXPERIMENTAL

3.3.1 PROCESSO DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

A gravação das FBGs é um ponto crítico do projeto e requer de uma infraestrutura dedicada a isso. As gravações dessas FBGs foram feitas no Laboratório de Fotônica (FOTON) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Curitiba. A gravação da FBG foi realizada no comprimento de onda de Bragg de 1540,9 nm, utilizando máscara de fase IBSEN com iluminação direta e laser excímero ArF (Coherent, modelo Xantos XS) operando a 193 nm com taxa de repetição do pulso de 250 Hz e 1,5 mJ de energia.

3.3.2 INSTALAÇÃO DAS FBGs DE TEMPERATURA

Após realizadas as gravações das FBGs, o seguinte passo é colocá-los dentro de um tubo metálico de aço inoxidável e colar esse conjunto no núcleo fixo do contator. Em um primeiro momento, inseriu-se a FBG dentro de um tubo metálico de aço inoxidável de dimensões 0,5x30 mm e colou-se uma das extremidades da FBG no tubo metálico, enquanto a outra extremidade do sensor fica livre para que possa se dilatar livremente quando há um

aumento na temperatura. Esse processo pode ser observado na Figura 17.

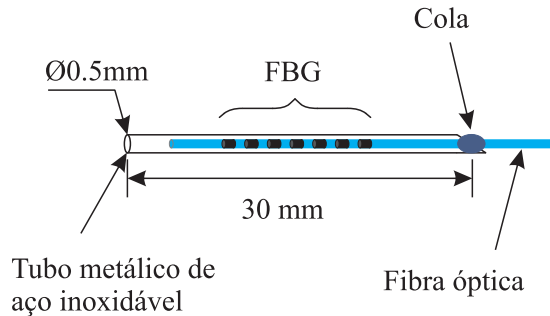


Figura 17: Esquema de encapsulamento da FBG de temperatura.

Além do encapsulamento das FBGs de temperatura, o seguinte passo é a calibração desses sensores em relação à temperatura. O Apêndice A detalha esse processo de calibração, na qual observou-se bons coeficientes de correlação linear de $R^2 = 0,9996$ para o sensor 1, $R^2 = 0,9997$ para o sensor 2 e $R^2 = 0,9997$ para o sensor 3. Ademais, as sensibilidades foram semelhantes iguais a $10,24\text{ }^\circ\text{C}$, $10,26\text{ }^\circ\text{C}$ e $10,26\text{ }^\circ\text{C}$ para os sensores 1, 2 e 3, respectivamente.

Após que as FBGs de temperatura serem encapsuladas e calibradas, utilizou-se uma cola epóxi da marca Araldite Hobby, com secagem total de 8 horas, para colar esses conjuntos (tubo metálico de aço inoxidável com a FBG inserido nele) na parte frontal do núcleo fixo, como se ilustra na Figura 18. Foram escolhidos três FBGs de temperatura para ser colados em pontos diferentes do núcleo fixo para verificar o comportamento da temperatura em pontos distintos. Esses pontos foram definidos no núcleo fixo devido à facilidade na colagem e na manipulação da fibra óptica. Além disso, as FBGs não foram multiplexadas por causa da necessidade de curvatura em pequeno espaço.

Para conectar as FBGs de temperatura com o interrogador óptico, utilizou-se o conector óptico tipo FC/APC, sendo que as emendas ópticas foram efetuadas com uma máquina de emenda por fusão (Sumimoto Electric, modelo: DCM Fusion Splicer TYPE-39), como se observa na Figura 18. Utilizou-se tubetes termo retráteis, para a proteção das emendas, com um elemento metálico inserido nele.

Depois das gravações e calibrações realizou-se a análise estatística dos dados obtidos com o propósito de estabelecer as incertezas dos valores medidos de comprimento de onda de Bragg. Para esse fim, determinou-se a incerteza tipo A dada pela Equação (30) (BORTOLOTTI et al., 2012):

$$u(\bar{x}) = \frac{s(x_k)}{\sqrt{n}}, \quad (30)$$

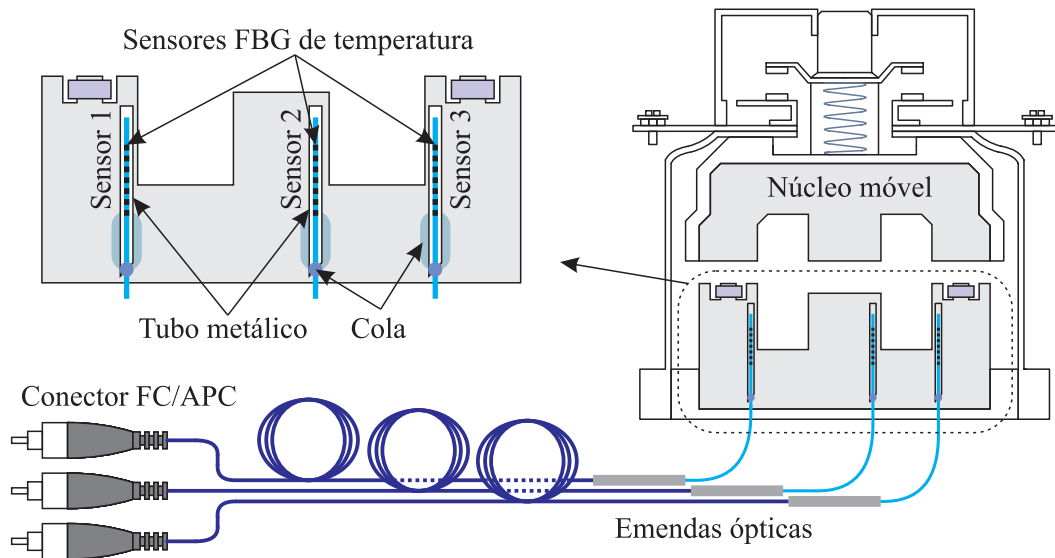


Figura 18: Esquema do contator com as FBGs de temperatura e os conectores.

em que $u(\bar{x})$ é a incerteza padrão da média de "n" medições referente à dispersão das amostras e $s(x_k)$ é o maior desvio padrão e n é o número de medições repetidas utilizadas para calcular a média. Para o cálculo das incertezas tipo A, considera-se $n=2$ e os maiores valores dos desvios padrões das Tabelas 6, 7 e 8 do Apêndice A, que são 0,707 pm, 1,061 pm e 0,708 pm para os sensores 1, 2 e 3 respectivamente:

$$u(\bar{x}) = \frac{0,707 \text{ pm}}{\sqrt{2}} = 0,5 \text{ pm}, \quad (31a)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{1,061 \text{ pm}}{\sqrt{2}} = 0,75 \text{ pm}, \quad (31b)$$

$$u(\bar{x}) = \frac{0,708 \text{ pm}}{\sqrt{2}} = 0,5 \text{ pm}, \quad (31c)$$

o que equivale a uma temperatura de 0,0488 °C para o sensor 1, 0,0731 °C para o sensor 2 e 0,0487 °C para o sensor 3. A incerteza dada na forma de desvio padrão e analisada por qualquer método que não seja estatístico é conhecida como incerteza padrão tipo B, correspondente aos erros sistemáticos residuais (VUOLO, 1996); a expressão que define essa incerteza é a seguinte:

$$u(\bar{x}) = \frac{\delta x}{\sqrt{12}}, \quad (32)$$

em que δx é a resolução do equipamento. Para determinar as incertezas tipo B, considerou-se as resoluções do interrogador óptico e do banho térmico, as quais são 1 pm e 0,25 °C. Para o caso da incerteza sistemática residual associada ao interrogador u_{HBM} , obtém-se a expressão (33) utilizando a Equação (32):

$$u_{HBM} = \frac{1 \text{ pm}}{\sqrt{12}} = 0,2887 \text{ pm.} \quad (33)$$

Esse valor da incerteza equivale a uma temperatura de 0,0282 °C para o sensor 1, 0,0281 °C para o sensor 2 e 0,0281 °C para o sensor 3. Para o banho térmico, a incerteza sistemática residual é $u_{PolyScience}=0,0722$ °C. Com os valores obtidos calcula-se as incertezas dos sensores de acordo com as Equações (34a), (34b) e (34c):

$$u_{c-S1} = 0,0488 + 0,0282 + 0,0722 = 0,1492 \text{ °C,} \quad (34a)$$

$$u_{c-S2} = 0,0731 + 0,0281 + 0,0722 = 0,1734 \text{ °C,} \quad (34b)$$

$$u_{c-S3} = 0,0487 + 0,0281 + 0,0722 = 0,1490 \text{ °C,} \quad (34c)$$

em que u_{c-S1} é a incerteza do sensor 1, u_{c-S2} é a incerteza do sensor 2, u_{c-S3} é a incerteza do sensor 3. Com os resultados obtidos das Equações (34a), (34b) e (34c), para uma probabilidade de 95,45 % e com um fator de abrangência igual a 2 ($t=4,527$) da Tabela 3, calcula-se os valores das incertezas expandidas que são definidos como as Equações (35a), (34b) e (34c):

$$u_{c-Exp-S1} = 0,1492 \times 4,527 = 0,6754 \text{ °C,} \quad (35a)$$

$$u_{c-Exp-S2} = 0,1734 \times 4,527 = 0,7850 \text{ °C,} \quad (35b)$$

$$u_{c-Exp-S3} = 0,1490 \times 4,527 = 0,6745 \text{ °C,} \quad (35c)$$

em que $u_{c-Exp-S1}$ é a incerteza expandida do Sensor 1, $u_{c-Exp-S2}$ é a incerteza expandida do Sensor 2 e $u_{c-Exp-S3}$ é a incerteza expandida do Sensor 3.

Tabela 3: Fatores de abrangência (t)

Graus de liberdade	t para 68,27 %	t para 95,45 %	t para 99,73 %
1	1,837	13,968	235,811
2	1,321	4,527	19,206
3	1,197	3,307	9,219
4	1,142	2,869	6,620
5	1,111	2,649	5,507
6	1,091	2,517	4,904
7	1,077	2,429	4,530
8	1,067	2,366	4,277
9	1,059	2,320	4,094
10	1,053	2,284	3,957

Fonte: (JUNIOR; SOUSA, 2008)

3.3.3 INSTALAÇÃO DA FBG DE DEFORMAÇÃO

A FBG para medir a deformação atua diretamente no núcleo fixo do contator. Foi colada sobre a superfície na parte posterior do núcleo fixo do contator. Foi escolhido a parte central do núcleo devido à facilidade na colagem, à direção da força magnética e à maior deformação. Além disso, fica na direção do fluxo magnético e por consequência maior impacto nessa região. Nas partes laterais do núcleo fixo é mais complexo a instalação das FBGs para medir deformação. Na colagem utilizou-se cola epóxi, do fabricante Araldite Hobby. Após a colagem, foi feita a conectorização e a emenda óptica, como se ilustra na Figura 19. Utilizou-se o conector FC/APC e a emenda óptica para conectar o interrogador óptico e a FBG.

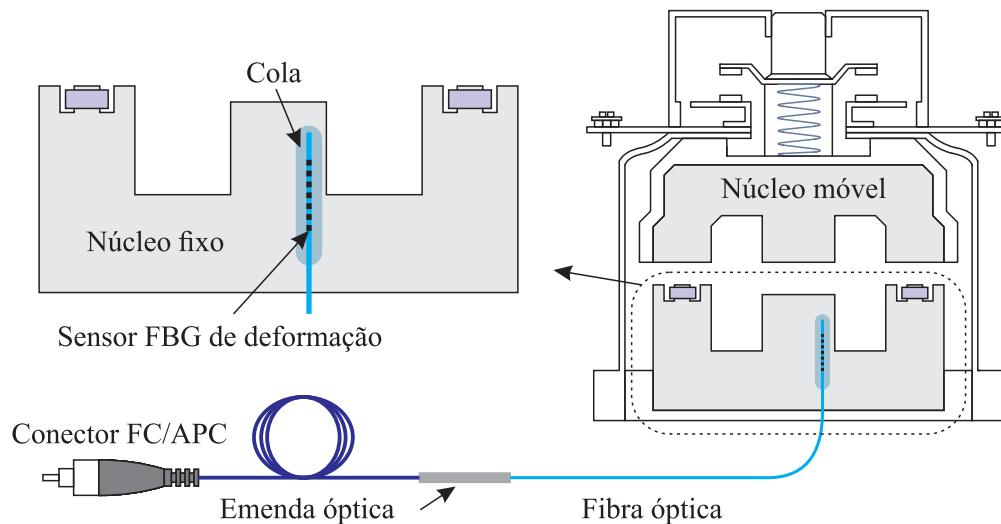


Figura 19: Esquema do contator com a FBG de deformação e o conector.

3.3.4 ENSAIOS DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO

Para a medição de temperatura, utilizou-se o circuito de acionamento do contator da Figura 20. O programa utilizado nos ensaios foi o *Catman Easy* Versão 3.1, para a leitura de dados do interrogador óptico, que operou com uma taxa de aquisição de dados de 5 Hz. Para essa medição, no programa *Catman Easy* ativou-se o botão de início da aquisição de dados e, após 10 minutos, ligou-se o interruptor para a energização da bobina do contator. Passados 190 minutos, desativou-se o botão de aquisição de dados. Esse tempo inicial é para observar o início da energização do contator.

Para a medição de deformação em condição de operação normal, empregou-se o circuito da Figura 20 para o acionamento do contator. O interrogador óptico operou a uma taxa de aquisição de dados de 1 kHz. No programa *Catman Easy*, ativou-se o botão do início da aquisição de dados e, após 1 segundo, ligou-se o interruptor para o energizado da bobina;

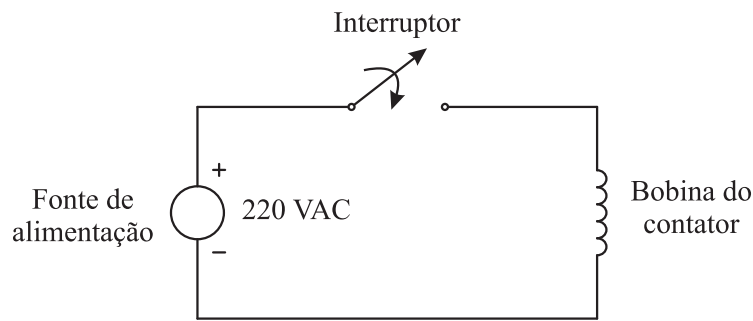


Figura 20: Circuito de acionamento 1 do contator.

posteriormente, passados 7 segundos da aquisição de dados, desligou-se o interruptor. Após esse tempo desativou-se o botão de aquisição de dados.

Para a medição de deformação com as quedas de tensão (na bobina do contator) de 20 V (ou seja, o valor da tensão cai de 220 V até 200 V) e 70 V (ou seja, o valor da tensão cai de 220 V até 150 V), utilizou-se o circuito da Figura 21 (inicialmente o interruptor 1 desligado e o interruptor 2 ligado). Os valores das resistências R para a queda de 20 V foi de $458,2 \Omega$ e para a queda de 70 V foi de 2656Ω . Esses valores de resistências foram obtidos de forma experimental, no caso da resistência de $458,2 \Omega$ foi a soma de uma resistência de 400Ω (KENT-FTSU-E 500W/400V) e o resto obtido de um reostato (Höchstbelastung 320Ω , 15 A), e para o caso da resistência de 2656Ω utilizou-se 6 resistências de 400Ω e o valor de 256Ω obtido do reostato de 320Ω .

As medições de tensão e corrente na bobina solenoide do contator foram feitas com um osciloscópio digital (Tektronix, modelo DPO 4104B), com uma taxa de amostragem de 1 kHz. O interrogador óptico operou a uma taxa de aquisição de dados de 1 kHz. No programa *Catman Easy*, ativou-se o botão de início de aquisição de dados; depois de 0,5 segundos, ligou-se o interruptor 1 para energizar o contator e, após 1 segundo da ligação do interruptor 1, desligou-se por aproximadamente 1 segundo o interruptor 2, para gerar a queda de tensão. Posteriormente, desligou-se o interruptor 1 para desenergização do contator e finalmente desativou-se o botão de aquisição de dados.

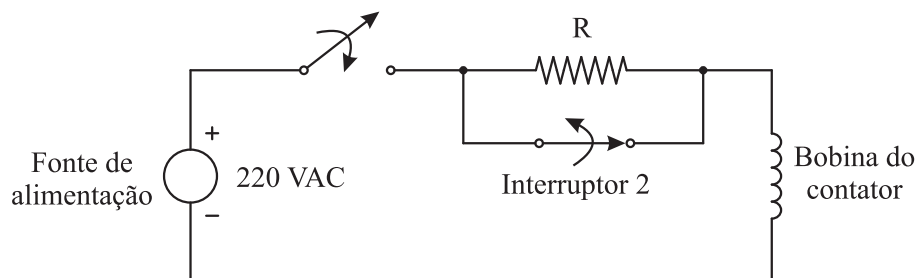


Figura 21: Circuito de acionamento 2 do contator.

Para as medições da deformações do contator com obstáculo no entreferro e do contator sem seus anéis de curto-circuito, usou-se o circuito da Figura 20, para a energização do contator. O interrogador óptico e o osciloscópio operaram a uma taxa de aquisição de dados de 1 kHz. No programa *Catman Easy*, ativou-se o botão de início de aquisição de dados; após 0,5 segundos, ligou-se o interruptor para a energização da bobina do contator. Posteriormente, depois de 3 segundos, desligou-se o interruptor, para logo desativar o botão de início de aquisição de dados.

No caso da medição de deformação do núcleo do contator com um obstáculo no entreferro, utilizou-se um pedaço de papel branco de 75 g/m^2 com uma dimensão de $25 \times 15 \text{ mm}^2$ como obstáculo no experimento prático, que foi colocado em um dos entreferros laterais, com o objetivo de simular esse tipo de falha.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentadas os resultados experimentais da deformação do núcleo do contator e o resultado da simulação da dinâmica do contator. Para a deformação são detalhadas os resultados do contator em condições normais de operação e com falhas.

4.1 TEMPERATURA NO NÚCLEO DO CONTATOR

As curvas do comportamento das três FBGs de temperatura localizados no núcleo do contator, conforme ilustra a Figura 18, são apresentadas na Figura 22. Os 10 minutos iniciais é para mostrar que o contator está em regime permanente. No instante de tempo $t=10$ minutos, o contator é energizado. Entre $t=10$ minutos e $t=80$ minutos, é observada uma rápida elevação da temperatura do núcleo do contator, chegando a $79,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sensor 1, $78,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sensor 2 e $79,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o sensor 3. A partir de $t=80$ minutos, o aumento da temperatura já não ocorre de forma muito acentuada. Próximo a $t=190$ minutos, a temperatura do núcleo estabiliza em $89,82\text{ }^{\circ}\text{C}$, $88,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $89,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ para os sensores 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar que as temperaturas das três FBGs são semelhantes, mas não são iguais, devido à distribuição da temperatura não ser uniforme ao longo da superfície do núcleo do contator.

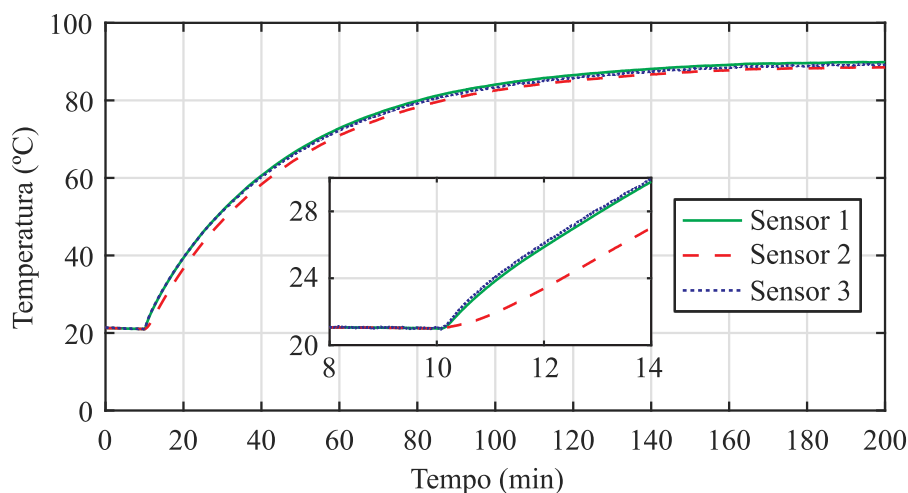


Figura 22: Variação da temperatura do núcleo do contator durante o período de teste.

Observa-se que as três FBGs possuem temperatura inicial igual a 21 °C (temperatura do ambiente) e têm o mesmo comportamento. Por outro lado, nota-se que as temperaturas registradas pelos sensores 1 e 3 aumentam mais rapidamente em comparação com a medida pelo sensor 2, devido que os entreferros laterais têm secções transversais menores que o entreferro central. A temperatura máxima atingida pelo Sensor 1 é de 89,85 °C, pelo Sensor 2 é de 88,50 °C e pelo Sensor 3 é de 89,04 °C. A variação de temperatura é de aproximadamente 68 °C, que é a diferença entre a temperatura de estabilização e a temperatura ambiente. O aumento da temperatura no núcleo fixo é provocado principalmente pelas perdas por efeito Joule na bobina do solenoide e pelas perdas magnéticas no núcleo.

4.2 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR SEM FALHA

Esta seção avalia o comportamento da deformação do núcleo do contator durante a operação normal, isto é, não se considera a ocorrência de falha durante o período de tempo analisado, como queda de tensão ou obstáculo no entreferro por exemplo. Para as análises dos resultados considera-se a energização do contator durante um período de tempo de 6 segundos. Nesse caso, o contator é energizado em $t=1$ s e desenergizado em $t=7$ s.

A Figura 23 apresenta a curva da deformação no núcleo fixo do contator, onde os efeitos da temperatura são compensados através da subtração da temperatura medida pelo sensor 2 da Figura 18. Essa compensação de temperatura se deve ao fato de que a variação no comprimento de onda depende da variação da deformação e da variação de temperatura, como pode ser visto na Equação (24). Além disso, é importante ressaltar que, para a compensação da temperatura, as medidas do sensor 2 e do sensor da deformação são realizadas ao mesmo tempo e para uma mesma taxa de aquisição de dados. A curva da deformação mostra a energização do contator, sendo possível observar que durante o regime permanente ($1 < t < 7$ s) a deformação média tem um valor de $16 \mu\epsilon$ (microstrain). No intervalo de tempo $7 < t < 8$ s pode-se observar que os valores da deformação não retornam para zero, devido à expansão térmica e ao magnetismo residual.

Quando a bobina solenoide está desenergizada, o contator permanece em repouso (etapa 1), ou seja, o núcleo móvel se mantém separado do núcleo fixo, como mostra a Figura 24. Verifica-se que, durante os instantes iniciais da energização, a deformação apresenta um pico e um vale, os quais equivalem a 40,9 e $-16,62 \mu\epsilon$, respectivamente. O vale acontece quando a bobina solenoide é energizada e, conseqüentemente, o núcleo móvel é puxado para abaixo (em direção ao núcleo fixo) pela força eletromagnética e colide com o núcleo fixo (etapa 2). Essa colisão faz com que o núcleo fixo sofra compressão, devido ao impacto com o núcleo móvel.

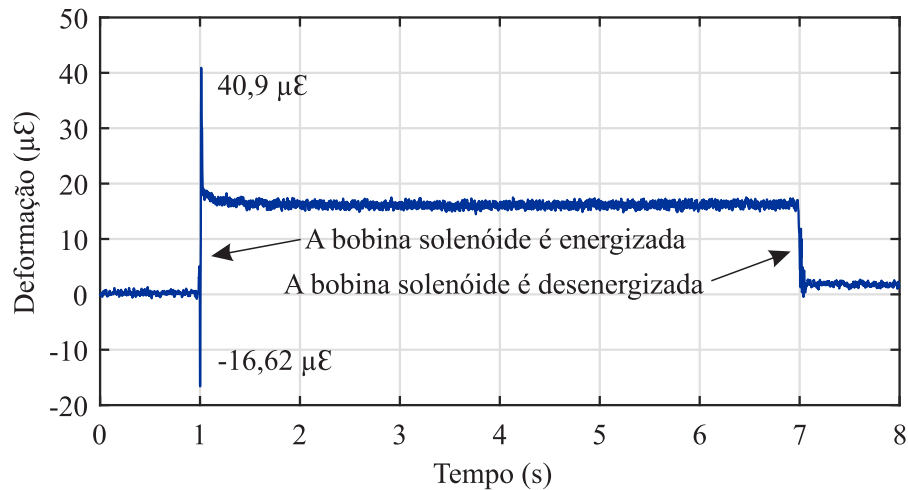


Figura 23: Deformação do núcleo do contator em condições normais de operação.

Depois disso, no pico, o núcleo móvel é empurrado em direção contrária ao núcleo fixo por ação da força eletromagnética, dando como resultado uma expansão do núcleo fixo (etapa 3). Depois do transiente, o contator permanece em regime permanente (etapa 4). Então, a deformação do núcleo é causada apenas pela força eletromagnética, possui uma parte constante e oscilatória (COLLINS; BRIDGWOOD, 1997).

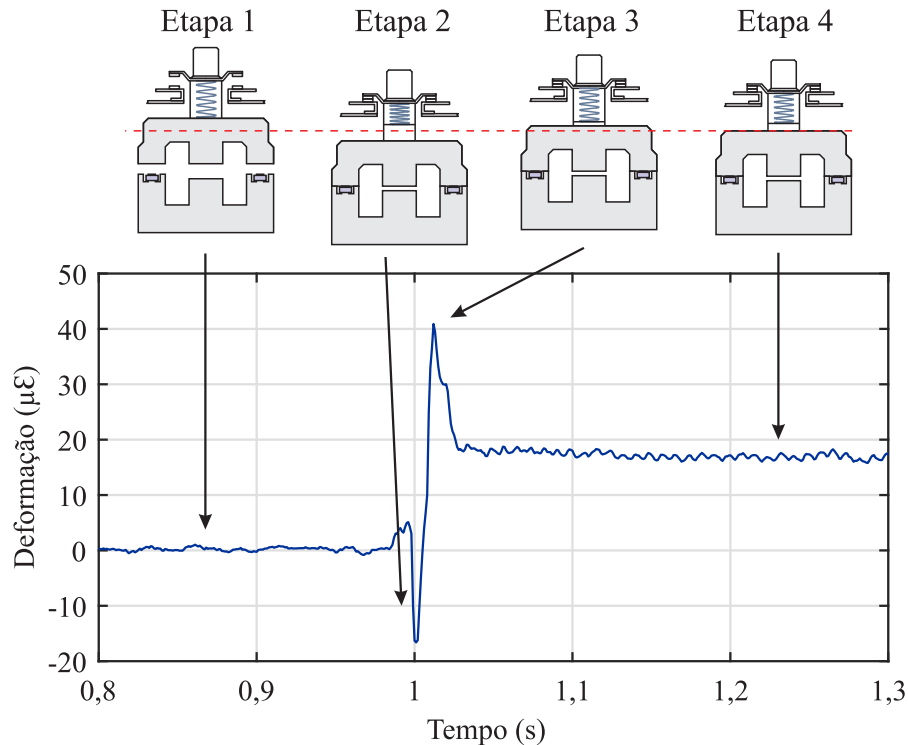


Figura 24: Transiente da deformação do núcleo do contator.

A Figura 25 apresenta a deformação sofrida pelo núcleo fixo devido à força eletromagnética, por um intervalo de tempo de 0,3 segundos (de 5,1 até 5,4 s), observando-se

um comportamento senoidal na forma de onda. Além disso, pode-se verificar que a amplitude dessa deformação é de aproximadamente de $0,94 \mu\epsilon$.

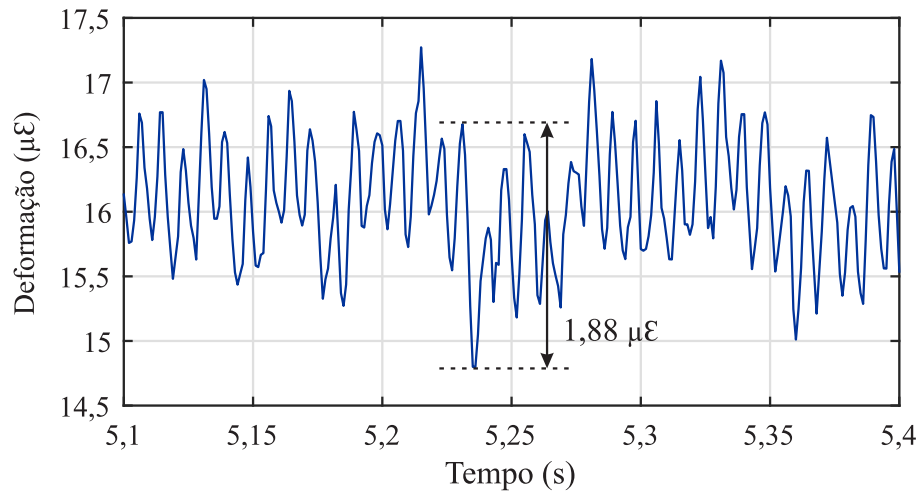


Figura 25: Deformação do núcleo do contator no regime permanente.

No regime permanente é possível identificar os componentes em frequência da deformação, aplicando a Transformada de Fourier no sinal. A Figura 26 mostra o espectro em frequência da deformação, onde pode-se distinguir a componente mais predominante em 120 Hz, a qual é duas vezes a frequência de fornecimento da rede. De acordo com a Equação (13), o fluxo magnético tem uma frequência de 60 Hz e a força eletromagnética teria o dobro dessa frequência, ou seja, 120Hz.

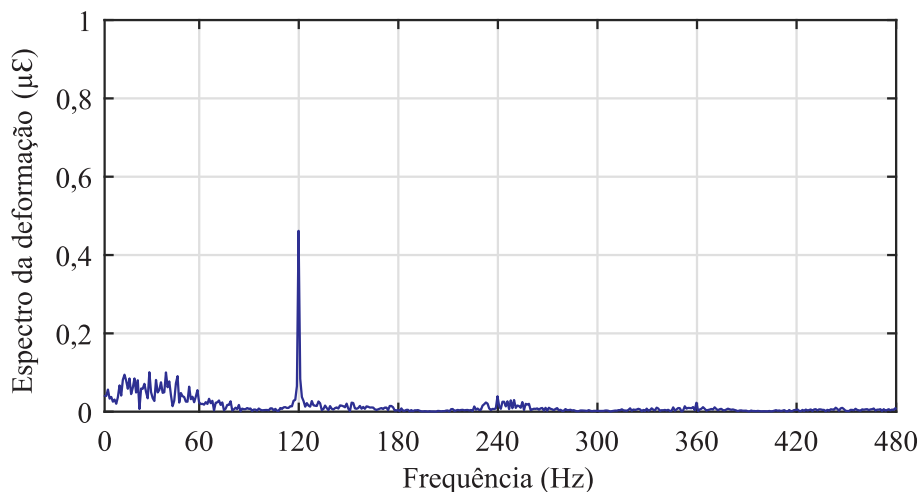


Figura 26: Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator.

Esses resultados, da deformação e o espectro em frequência dele, servem como base de referência para analisar os diferentes casos em que os contatores estão sujeitos a falhas, que serão apresentados nas seguintes seções.

4.3 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR CONSIDERANDO UMA QUEDA DE TENSÃO

Nesta seção serão abordados os comportamentos da deformação no núcleo fixo do contator e da corrente que passa pela bobina solenoide em uma condição de falha, isto é, considerando dois cenários diferentes: cenário 1, com a queda de tensão de 20 V, e cenário 2, com a queda de tensão de 70 V, para observar o comportamento da deformação, tensão e corrente durante essas quedas. São consideradas essas quedas de tensão já que o contator opera de maneira normal nessa faixa (ou seja, entre 220 V e 150 V). Abaixo de 150 V o contator tem problemas como colisões entre os núcleos fixo e móvel e mudança repentina na tensão. Para as análises dos resultados, considera-se a energização da bobina durante um tempo de 3 segundos: a bobina é energizada em $t=0,5$ s e desenergizada em $t=3,5$ s, além disso, aplica-se as quedas de tensão em um intervalo de tempo de 1 segundo (ou seja, entre $t=1,5$ s e $t=2,5$ s).

A Figura 27 ilustra as formas de onda da deformação, das tensões com as quedas de tensão de 20 V e 70 V, e das correntes que circulam pela bobina solenoide. No cenário 1 (com a queda de tensão de 20 V), a deformação apresenta um pico e um vale no instante de energização da bobina solenoide (ou seja, em $t=0,5$ s), de $24,58 \mu\epsilon$ e $-9,72 \mu\epsilon$, respectivamente, como se observa na Figura 27 (a). Por outro lado, no cenário 2 (com a queda de tensão de 70 V), a deformação também apresenta um pico e um vale, o pico de $17,38 \mu\epsilon$ e o vale de $-6,20 \mu\epsilon$. A Figura 27 (b) apresenta a forma de onda da tensão na bobina para os dois cenários. Nota-se que não há picos de tensão no instante da energização da bobina solenoide. Na Figura 27 (c) são apresentadas as formas de onda da corrente que passa pela bobina solenoide. Pode-se observar um pico e um vale na corrente, no instante da energização da bobina solenoide, um pico de 0,73 A e um vale de -1,77 A para o cenário 1. Além disso, observa-se no instante da energização um pico e um vale, de 1,80 A e -0,73 A, respectivamente, para o cenário 2.

Para melhor distinguir o comportamento da deformação, da tensão e da corrente que passa pela bobina, são mostradas na Figura 28, considerando um intervalo de tempo igual a 0,3 s (entre $t=1,35$ s e $t=1,65$ s). Para o cenário 1 (com a queda de tensão de 20 V) a deformação apresenta uma queda de $0,83 \mu\epsilon$ e para o caso do cenário 2 (com a queda de tensão de 70 V) uma queda de $1,86 \mu\epsilon$ na deformação, como é mostrado na Figura 28 (a). Os valores nominais da tensão e corrente que passa pela bobina antes da queda de tensão, são de 220,05 V e 84,85 mA, respectivamente. Já durante a queda de tensão se tem os valores de tensão e corrente de 200,11 V e 73,96 mA, para o cenário 1, e 150,05 V e 48,37 mA para o cenário 2, conforme ilustrado nas Figuras 28 (b) e (c). Por outro lado, pode-se observar que a corrente da bobina está adiantada no tempo em relação à tensão, devido à carga apresentar uma característica indutiva.

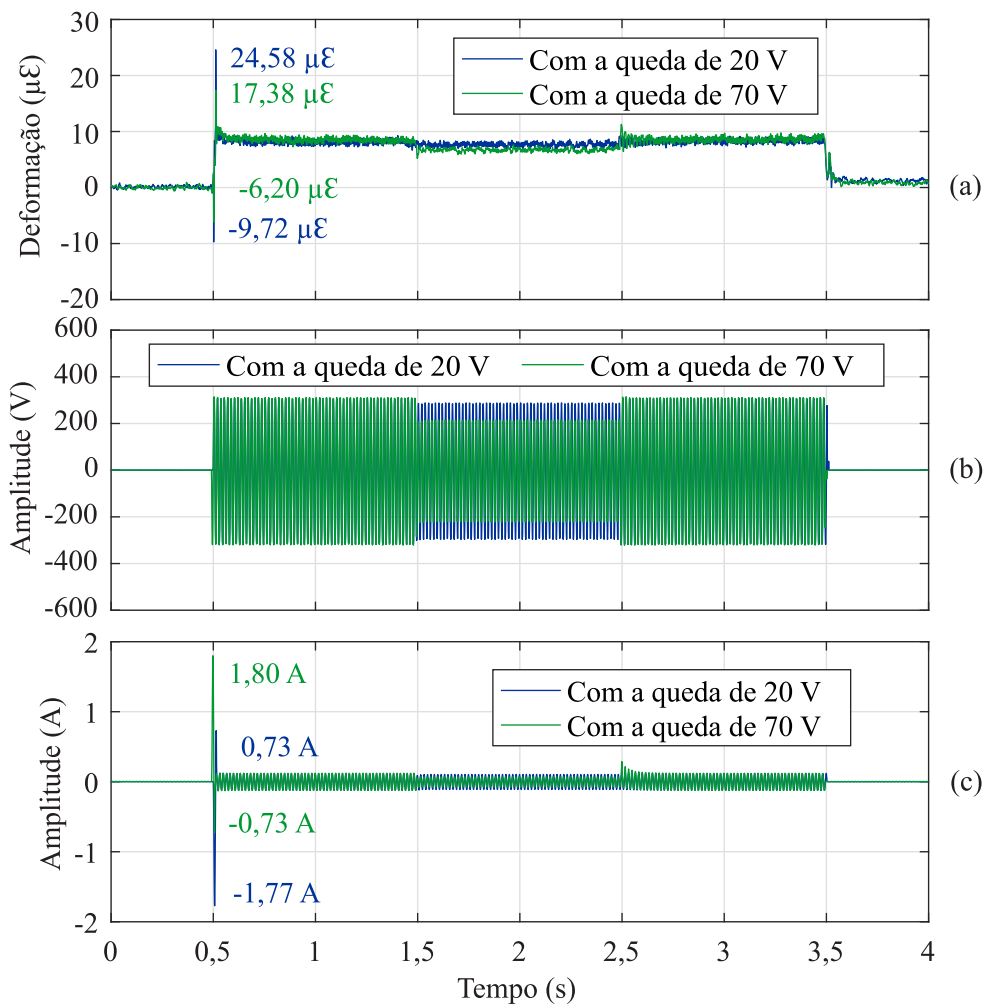


Figura 27: Formas de onda durante a energização da bobina com as quedas de tensão: (a) Deformação do núcleo do contator, (b) Tensão na bobina e (c) Corrente que circula na bobina.

Para o caso do contator sujeito a uma queda de tensão, também é possível identificar se a forma de onda da deformação sofre alguma alteração durante essa queda. A Figura 29 ilustra o espectro em frequência da deformação com quedas de tensão de 20 V e 70 V. Durante a queda de tensão, a forma de onda da deformação continua sendo senoidal, com uma componente predominante em 120 Hz. Observa-se também que quanto maior é a queda de tensão menor é a amplitude dessa componente.

Os picos na deformação são produzidos pelos picos da corrente que circula pela bobina durante a energização, em $t=0,5$ s. Além disso, durante uma queda na tensão também se produz uma queda na deformação do núcleo do contator. Quanto maior é a queda de tensão, maior será a queda na deformação. Por outro lado, quanto maior a queda de tensão, menor será a amplitude da componente em 120 Hz.

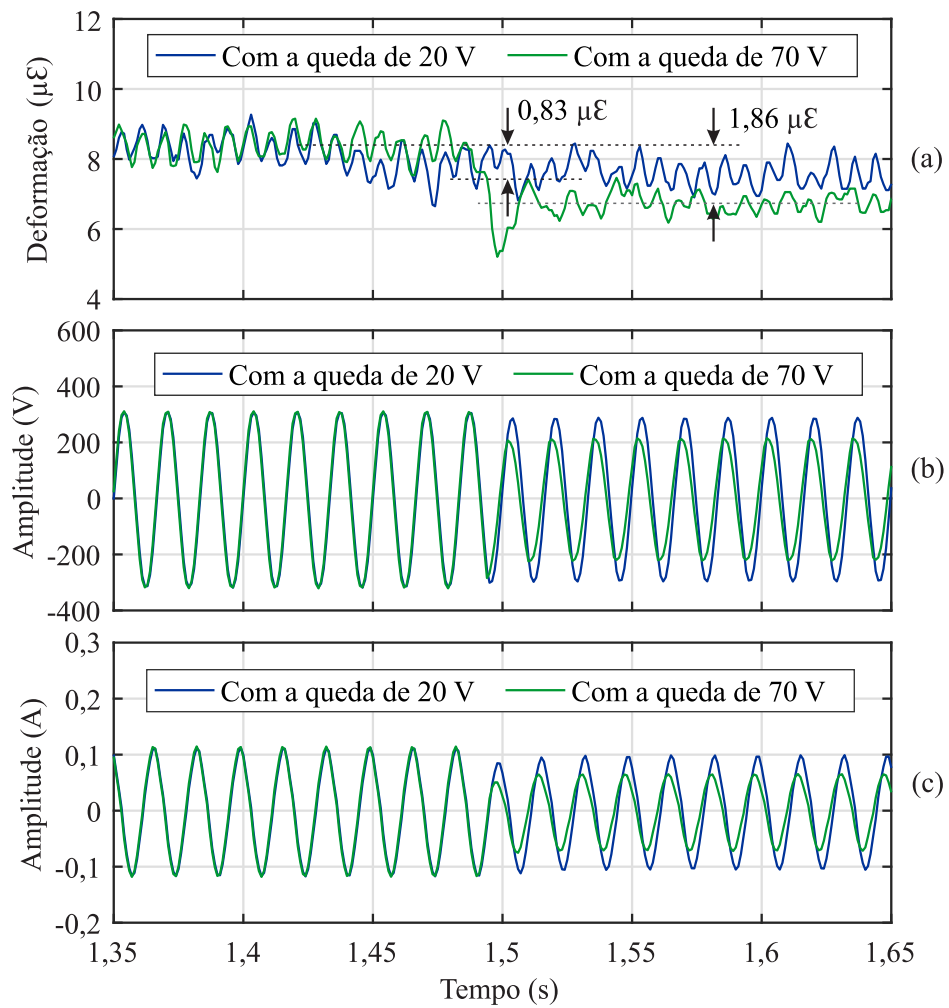


Figura 28: Formas de onda durante as quedas de tensão: (a) Deformação do núcleo do contator, (b) Tensão na bobina, (c) Corrente que circula na bobina.

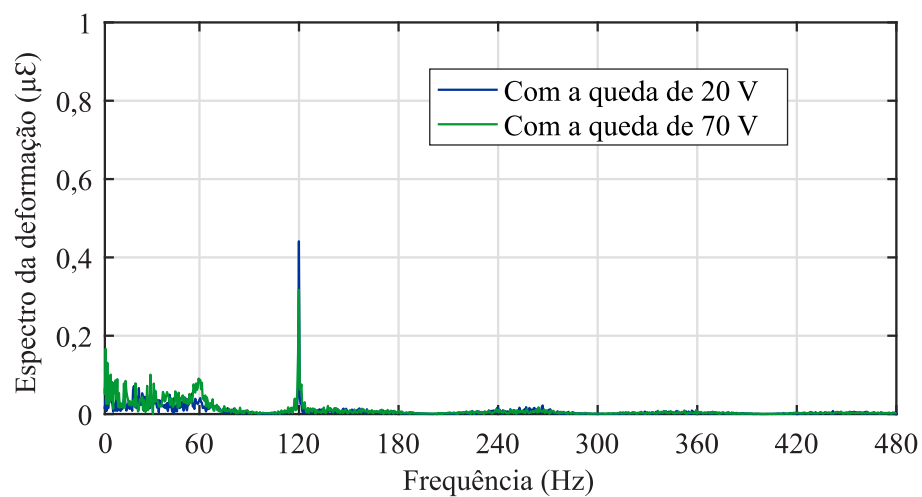


Figura 29: Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator com a queda de tensão.

4.4 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR CONSIDERANDO UM OBSTÁCULO NO ENTREFERRO

Esta seção analisa o comportamento da deformação do núcleo do contator durante sua operação com uma falha, neste caso considerando um obstáculo no entreferro. Esse obstáculo foi colocado no meio de um dos entreferros laterais com o objetivo de simular essa falha, que consiste em colisões entre os núcleos fixo e móvel. As colisões aparecem devido que a força eletromagnética depende da permeabilidade do material no meio dos entreferros que é diferente à permeabilidade do ar. Para as análises dos resultados, considera-se a energização da bobina solenoide por um tempo de 3 segundos: a bobina solenoide é energizada em $t=0,5$ s e desenergizada em $t=3,5$ s.

A Figura 30 ilustra as formas de onda da deformação do núcleo fixo do contator, da tensão e da corrente que circula pela bobina solenoide. Na forma de onda da deformação, pode-se observar um pico e um vale no instante da energização (em $t=0,5$ s), o pico de $21,61 \mu\epsilon$ e o vale de $-5,31 \mu\epsilon$. Além disso, a deformação tem um valor médio de $4 \mu\epsilon$, no entanto, os valores máximos e mínimos estão numa faixa de $9,98 \mu\epsilon$, conforme mostrado na Figura 30 (a). Por outro lado, a forma de onda da corrente que circula pela bobina apresenta um pico e um vale de $0,69$ A e $-1,78$ A, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 30 (b).

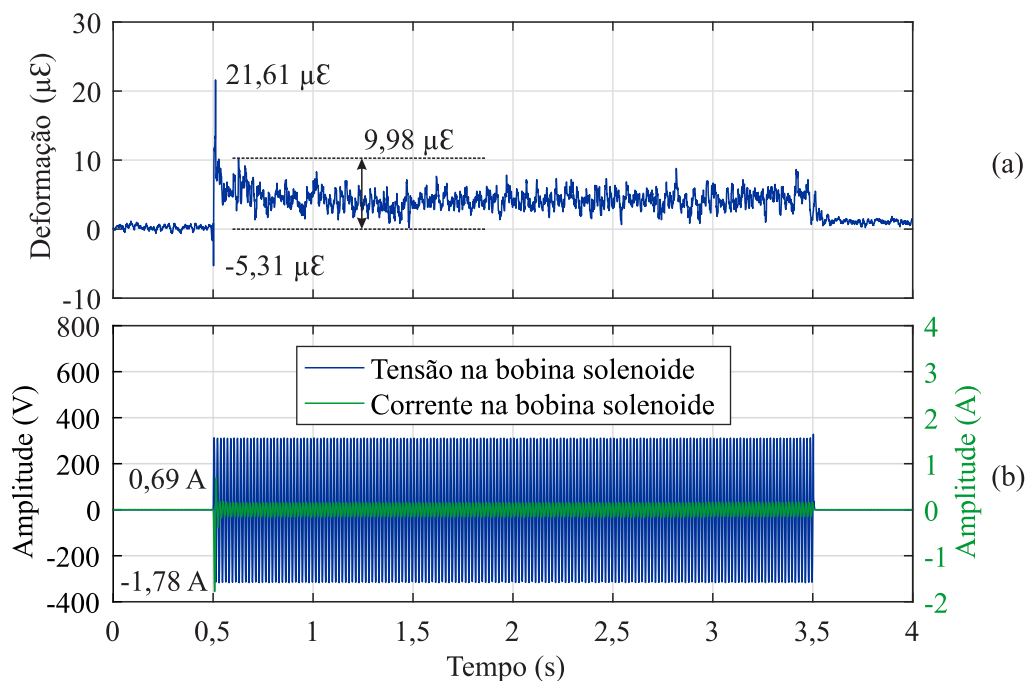


Figura 30: (a) Deformação do núcleo fixo do contator com um obstáculo no entreferro, (b) tensão e corrente através da bobina solenoide.

Para melhor observar o comportamento da tensão e da corrente na bobina, são mostradas essas formas de onda na Figura 31. Observa-se que a tensão é senoidal, mas a

corrente não é puramente senoidal, devido ao ruído mecânico gerado pelas colisões entre os núcleos fixo e móvel. Os valores da tensão e da corrente na bobina são 219,70 V e 106,70 mA, respectivamente. Esse valor da corrente é 1,26 vezes mais elevado que o valor da corrente da bobina do contator livre de falha.

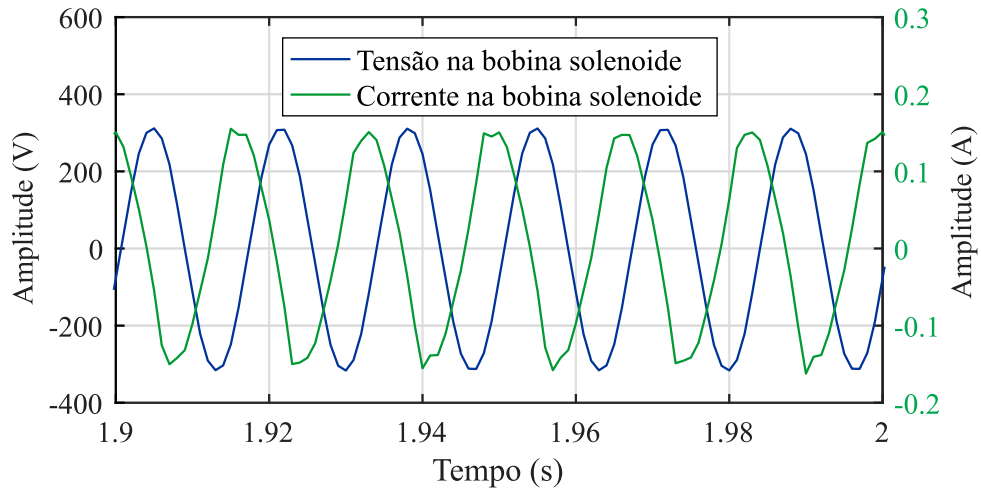


Figura 31: Formas de onda da tensão e da corrente que circula pela bobina do contator com um obstáculo no entreferro.

No caso do contator sujeito a um obstáculo no entreferro, é possível identificar as componentes em frequência da deformação, devido que essa forma de onda não é puramente senoidal. A Figura 32 ilustra o espectro em frequência da deformação, na qual pode-se observar uma componente em 120 Hz, mas as predominantes estão em 40 Hz e 20 Hz, que são devidas às colisões mecânicas entre os núcleos fixo e móvel, .

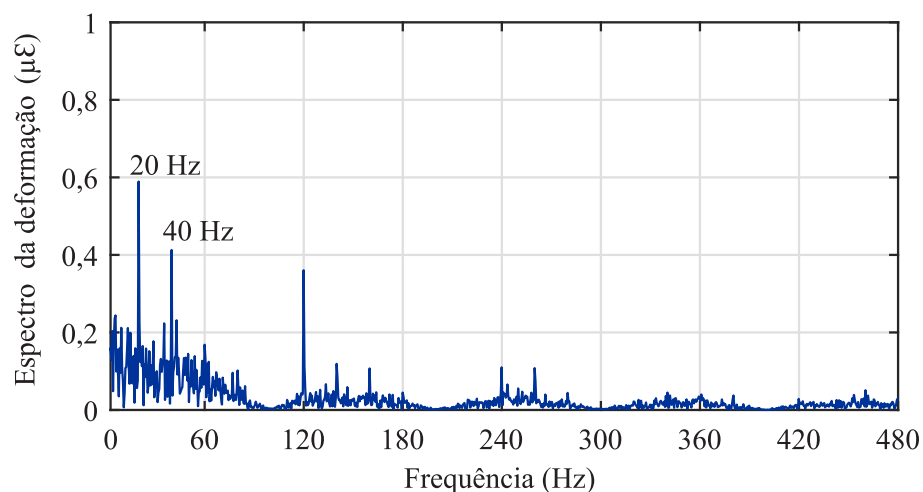


Figura 32: Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator com um obstáculo no entreferro.

A Figura 33 mostra a espectro em frequência da corrente que passa pela bobina solenoide do contator com um obstáculo no entreferro, onde pode-se observar que a componente

predominante está em 60 Hz, mas têm componentes de pequenas amplitudes em frequências múltiplos de 60 Hz.

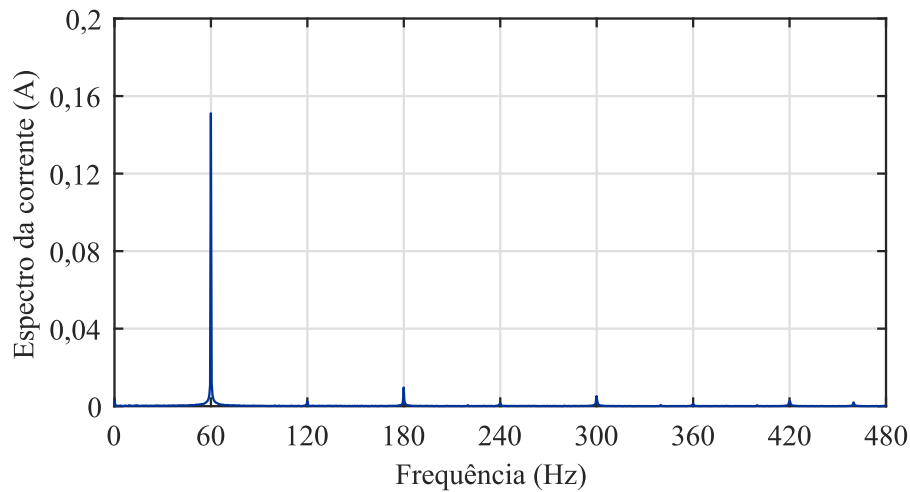


Figura 33: Espectro em frequência da corrente do contator com um obstáculo no entreferro.

Os resultados dos espectros em frequência da deformação e da corrente que circula pela bobina, permitem identificar suas componentes em frequência diferentes à fundamental. Nesse sentido, observou-se que as componentes em frequência da deformação foram mais visíveis, quando comparada com as componentes em frequência da corrente que circula pela bobina.

4.5 DEFORMAÇÃO DO NÚCLEO DO CONTATOR SEM OS ANÉIS DE CURTO-CIRCUITO

Nesta seção serão discutidos o comportamento da deformação no núcleo do contator e da corrente que passa pela bobina em uma condição de falha, considerando o contator sem seus anéis de curto-circuito. Em alguns trabalhos científicos se abordam as simulações da dinâmica do contator, especificamente em Riba et al. (2008) é apresentada a simulação da trajetória do núcleo fixo do contator sem os anéis de curto-circuito. Para as análises dos resultados considera-se que a bobina do contator é energizada em $t=0,5$ s e desenergizada em $t=3,5$ s, ou seja, que o contator permanece energizado por um tempo de 3 s.

A Figura 34 apresenta as formas de onda da deformação do núcleo do contator, da tensão e da corrente que passa pela bobina. Observa-se que a deformação tem um valor médio de $5 \mu\epsilon$, além disso, a deformação está numa faixa dos valores máximo e mínimo de $27,45 \mu\epsilon$ e $-9,88 \mu\epsilon$, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 34 (a). Por outro lado, a corrente que circula pela bobina apresenta um pico de 1,95 A no instante da energização, em $t=0,5$ s, como mostra a Figura 34 (b).

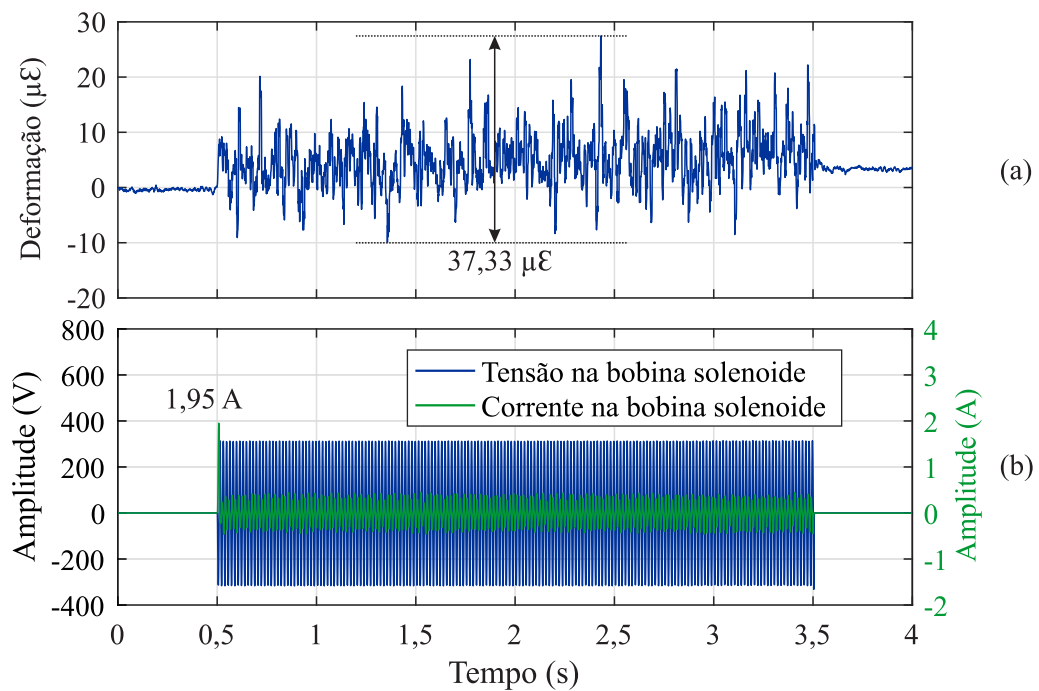


Figura 34: (a) Deformação do núcleo fixo do contator sem os anéis de curto-circuito, (b) tensão e corrente através da bobina solenoide.

Para entender melhor o comportamento da tensão e da corrente na bobina, são ilustradas tais formas de onda durante um tempo de 0,1 s (entre os tempos de $t=1,9$ s e $t=2$ s) na Figura 35. Observa-se que a forma de onda da tensão é senoidal, mas da corrente não é puramente senoidal, devido ao ruído mecânico gerado pelas colisões entre os núcleos fixo e móvel. Os valores de tensão é 220,05 V e da corrente é 266,79 mA. Esse valor da corrente é 3,14 vezes mais elevado que a corrente que circula na bobina do contator com seus anéis de curto-circuito.

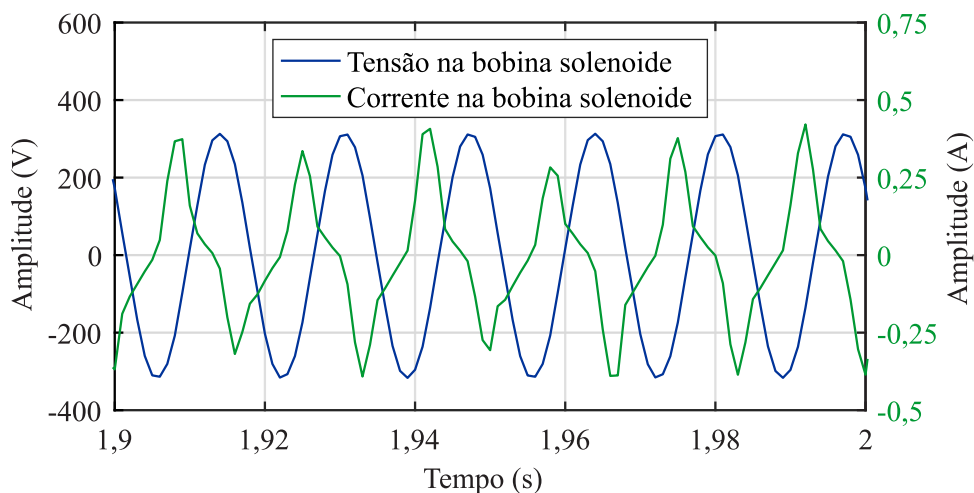


Figura 35: Forma de onda da tensão e da corrente que circula através da bobina do contator sem os anéis de curto-circuito.

Com a remoção dos anéis de curto-circuito as vibrações aumentaram consideravelmente, ou seja, os contatos abrem e fecham constantemente. A Figura 36 ilustra o espectro em frequência da deformação, na qual pode-se identificar uma componente em 120 Hz, entretanto se tem maior predominância das componentes entre 0 e 50 Hz, que são devidas às vibrações mecânicas dos núcleos fixo e móvel.

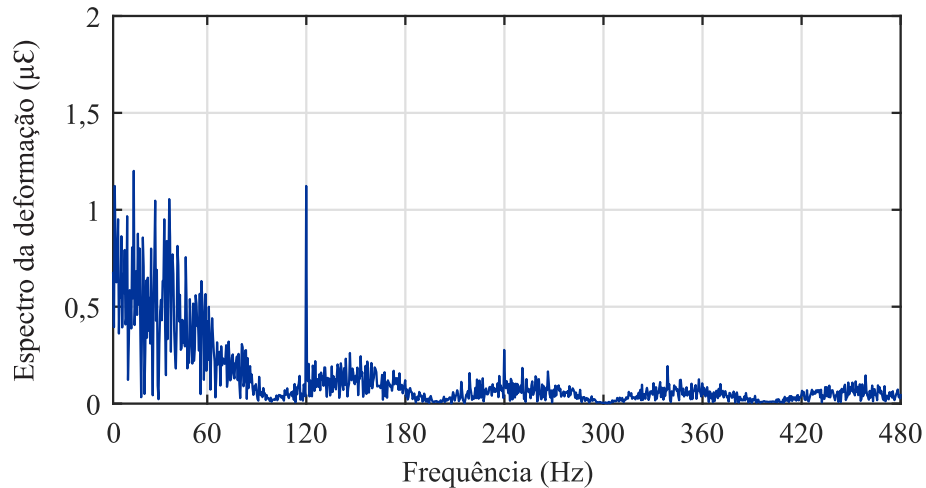


Figura 36: Espectro em frequência da deformação no núcleo do contator sem seus anéis de curto-circuito.

A Figura 37 mostra a espectro em frequência da corrente que passa pela bobina solenoide do contator sem seus anéis de curto-circuito, onde pode-se observar que a componente predominante está em 60 Hz, mas têm componentes de pequenas amplitudes em frequências múltiplos de 60 Hz. Note-se que a componente em 180 Hz tem uma amplitude considerável, que é por causa das colisões dos núcleos fixo e móvel.

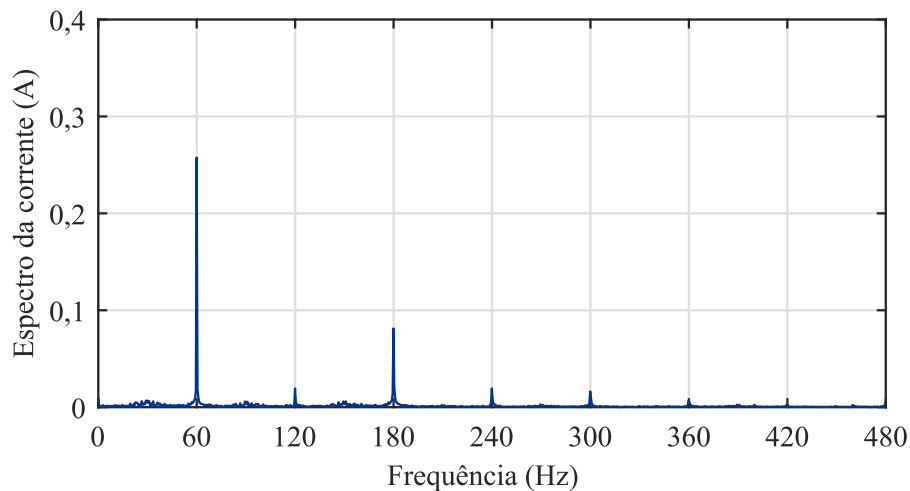


Figura 37: Espectro em frequência da corrente do contator sem seus anéis de curto-circuito.

Os resultados dos espectros em frequência da deformação e da corrente que circula pela bobina, ajudam na detecção de rachaduras nos anéis de curto-circuito (ou num caso extremo sem

anéis de curto-circuito), mediante a detecção dos componentes menores a 50 Hz, de amplitudes quase iguais à fundamental, no espectro em frequência da deformação ou na detecção de uma componente em 180 Hz com amplitude de quase metade que a componente fundamental.

Nota-se a diferença entre o espectro em frequência da deformação do núcleo com obstáculo no entreferro, que apresenta componentes em frequências específicas como em 20 Hz e 40 Hz, e o espectro em frequência da deformação do núcleo sem os anéis de curto-circuito que têm mais de dois componentes entre a faixa de 0 e 50 Hz, ou seja, pode-se diferenciar o tipo de falha que o contator tem.

4.6 SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CONTATOR

Nessa seção são apresentados o fluxograma da simulação da dinâmica do contator, os parâmetros elétricos e mecânicos e os resultados obtidos na simulação da dinâmica do contator com o auxílio do *software* Matlab®. No programa principal da presente simulação são descritas as informações relacionadas às características construtivas do contator (como os comprimentos das molas principal e dos contatos, massa do núcleo fixo, número de espiras da bobina solenoide e do anel de curto-circuito) e as dimensões físicas. Para a simulação consideram-se as equações de estado que descrevem a dinâmica do contator, que foram resolvidas empregando o algoritmo ode23tb do *software* Matlab®.

A Figura 38(a) apresenta o fluxograma da simulação da dinâmica do contator, sendo que no programa principal declaram-se as variáveis relacionadas as dimensões físicas e construtivas do contator, as opções do algoritmo ode23tb, as condições das variáveis de estado, o tempo de simulação, a rotina de resolução e a plotagem dos resultados. A rotina de resolução das equações é mostrada na Figura 38(b), nessa rotina tem-se a leituras das variáveis no programa principal, cálculo das relutâncias, dos fluxos, da força eletromagnética, da força elástica e do peso, além disso, tem-se o cálculo das equações de estado como correntes, velocidade e distância. As informações experimentais indispensáveis, tais como, os parâmetros elétricos e mecânicos são mostrados nas Tabelas 4 e 5, as quais foram medidas em laboratório.

Tabela 4: Parâmetros mecânicos do contator

Descrição	Valor	Unidade
Deslocamento do núcleo móvel	0,005	m
Coefficiente de elasticidade da mola principal	175	N/m
Comprimento da mola principal	0,024	m
Coefficiente de elasticidade das molas dos contatos	125	N/m
Comprimento das molas dos contatos	0,010	m
Massa do núcleo móvel	0,150	kg

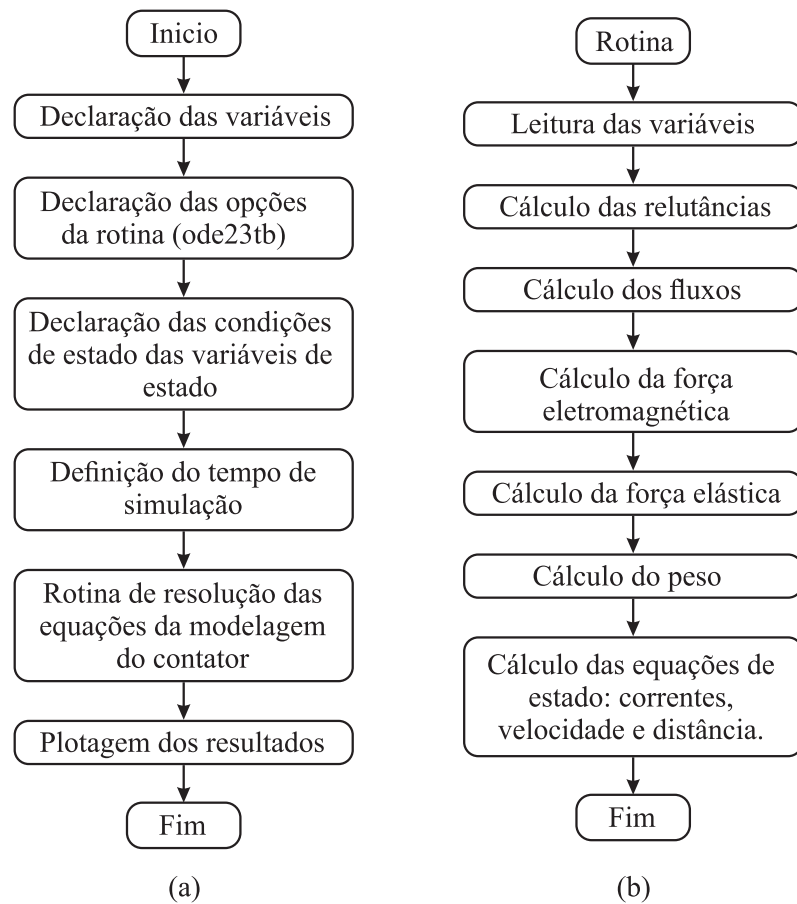


Figura 38: Fluxograma da simulação da dinâmica do contator: (a) programa principal, (b) rotina de resolução.

A Figura 39 ilustra o resultado do comportamento da posição do núcleo móvel do contator, onde observa-se que a distância do entreferro de 5 mm em $t=0$ s, ou seja, em sua posição inicial. Quando é aplicada uma tensão de 220 V a partir do instante $t=0$ s, o núcleo móvel começa a se deslocar em direção ao núcleo fixo até se encontrar com ele. Em $t=16$ ms o núcleo fixo encontra-se com o núcleo móvel, sendo esse fenômeno caracterizado no gráfico por uma distância $d=0$ mm. Dessa forma, o tempo necessário para o núcleo móvel se deslocar 5 mm e se encontrar com o núcleo fixo é de 16 ms. Esse tempo está de acordo com os limites apresentados na Tabela 2.

Tabela 5: Parâmetros elétricos do contator

Descrição	Valor	Unidade
Tensão nominal	220	V
Frequência	60	Hz
Número de espiras da bobina solenoide	4863	
Resistência da bobina solenoide	87	Ohms
Resistência do anel de curto-circuito	0,00021	Ohms

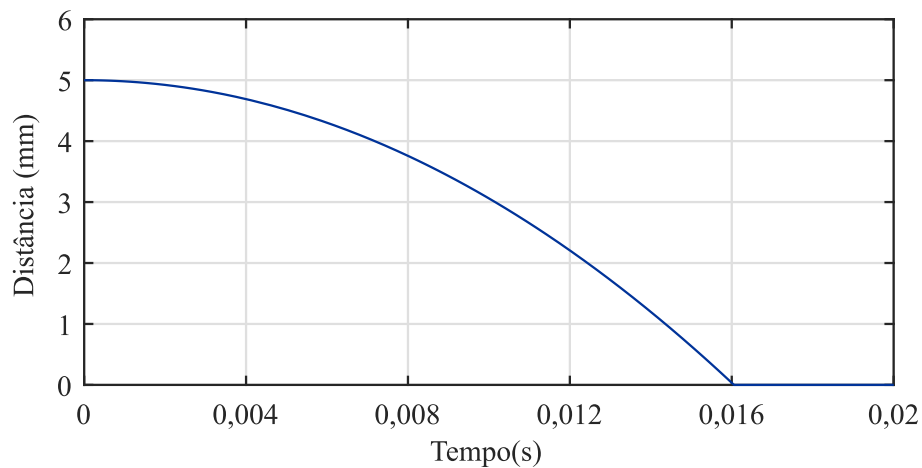


Figura 39: Comportamento da posição do núcleo móvel.

O resultado do comportamento da força eletromagnética no núcleo do contator é mostrado na Figura 40, onde pode-se observar um pico de 416,3 N em $t=16,06$ ms. Por outra parte, a força eletromagnética tem uma amplitude de 20 N. A partir de $t=80$ ms a força eletromagnética torna-se completamente senoidal. A forma de onda da força eletromagnética é similar à deformação do núcleo do contator, mostrada na Figura 24.

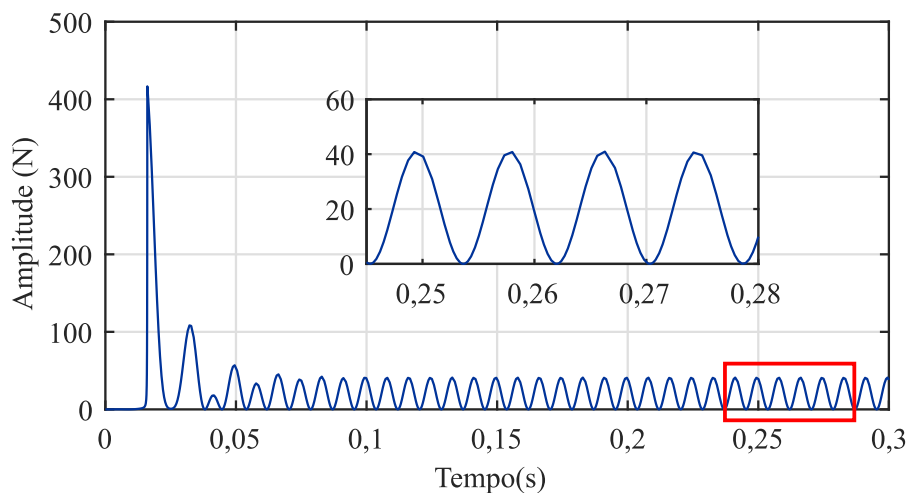


Figura 40: Comportamento da força eletromagnética no núcleo do contator.

Ao comparar a forma de onda da deformação da Figura 23 com a forma de onda da força eletromagnética da Figura 40, observa-se semelhança entre os regimes permanentes em ambos os casos, com uma forma de onda senoidal. Pode-se verificar também que o regime transitório da deformação apresenta um pico e um vale, no entanto, a força eletromagnética, só tem pico, devido que a simulação não têm compressão nem expansão.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o estudo do comportamento dinâmico da deformação e da temperatura no núcleo do contator eletromagnético, utilizando FBGs. Para a medição de deformação foi utilizado uma FBG e para a medição de temperatura foram utilizadas três FBGs.

Nos testes em laboratório para a calibração das FBGs de temperatura, observou-se bons coeficientes de correlação linear de $R^2 = 0,9996$ para o sensor 1, $R^2 = 0,9997$ para o sensor 2 e $R^2 = 0,9997$ para o sensor 3. Além disso, as sensibilidades em temperaturas foram muito próximas entre elas iguais a 10,24 °C, 10,26 °C e 10,26 °C para os sensores 1, 2 e 3, respectivamente.

Na medição da temperatura, as três FBG começaram a medir no mesmo ponto inicial, ou seja em 21 °C, no entanto as temperaturas dos extremos do núcleo fixo incrementou-se de forma mais rápida. Além disso, a máxima temperatura no núcleo do contator foi atingida em cerca de $t = 190$ minutos. As perdas por efeito joule na bobina solenoide e as perdas magnéticas no núcleo levam num aumento da temperatura.

Para a medição da deformação do núcleo do contator sem falha, três estados foram observados: o transiente quando a bobina solenoide é energizada, o regime permanente e o transiente quando a bobina solenoide é desenergizada. O uso de uma FBG para medir a deformação permitiu identificar a força electromagnética senoidal no núcleo do contator. No regime permanente, a força electromagnética senoidal apresentou uma componente pronunciada na frequência de 120 Hz.

No caso da medição da deformação do núcleo do contator com a queda de tensão, foram observados também os três estados. No instante da queda de tensão ocorre, do mesmo modo, uma queda na deformação. Observou-se que a forma de onda da deformação segue a mesma forma de onda da corrente que circula na bobina solenoide.

Observou-se que a análise da FFT da deformação pode indicar a presença de falhas, como obstáculo no entreferro e problemas com os anéis de curto-circuito, pela presença de componentes em frequência entre 0 e 60 Hz de magnitudes consideráveis. Porém, o que é

identificado na análise da FFT da deformação também pode ser identificado pela análise da corrente na bobina do contator.

A simulação da dinâmica do contator permitiu identificar o comportamento da força eletromagnética no núcleo do contator. No instante do transitório observou-se um pico, similar ao pico obtido da deformação do núcleo do contator no experimento prático. Além disso, no regime permanente, apreciou-se que a força eletromagnética tem forma de onda senoidal.

5.1 ATIVIDADES FUTURAS

Neste trabalho os testes experimentais, temperatura e deformação do núcleo do contator, foram realizadas no laboratório. Para trabalhos futuros pode-se realizar os testes experimentais em campo, ou seja, instalar as FBGs num contator já instalado. Para isto, esses sensores já teriam que estar calibrados em laboratório.

Além disso, em trabalhos futuros pode-se realizar testes experimentais do contator conectado a uma carga, seja um motor ou outro dispositivo ligado a ele.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, H.; MUNTINI, M.; SUBAER. Meta-clay geopolymer as encapsulator of FBG temperature sensor. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 15131–15136, 2018.
- BAI, R. et al. Hydraulics characteristics of forward osmosis membrane module boundary based on FBG sensing technology: Hydraulic properties and operating condition optimization. **Chemosphere**, v. 226, p. 553–564, 2019.
- BORTOLOTTI, F. et al. Packaging, characterization and calibration of fiber bragg grating temperature sensors. **signal**, v. 5, p. 6, 2012.
- CAZO, R. M. et al. Sensor de Deformação Usando Grades de Bragg. **Telecomunicações**, v. 03, p. 76–79, 2000.
- CHUNG, S. K.; KOCH, C. R.; LYNCH, A. F. Flatness-Based Feedback Control of an Automotive Solenoid Valve. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 15, p. 394–401, 2007.
- COLLINS, E.; BRIDGWOOD, M. The impact of power system disturbances on AC-coil contactors. In: **1997 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 37, p. 2.
- COLLINS, E.; ZAPARDIEL, F. An experimental assessment of AC contactor behavior during voltage sags. In: **ISIE '97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. aaa: IEEE, 1997. v. 2, n. 3, p. 439–444. ISBN 0-7803-3936-3.
- CULSHAW, B.; KERSEY, A. Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective. **Journal of Lightwave Technology**, v. 26, p. 1064–1078, 2008.
- DIANOV, E.; MASHINSKY, V. Germania-based core optical fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 23, p. 3500–3508, 2005.
- DJOKIC, S.; MILANOVI, J. Advanced voltage sag characterisation. Part I: Phase shift. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 153, p. 423, 2006.
- DJOKIC, S.; MILANOVI, J.; ROWLAND, S. Advanced voltage sag characterisation II: point on wave. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 1, p. 146, 2007.
- DJOKIC, S.; MILANOVIC, J.; KIRSCHEN, D. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions, and Undervoltage Transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, p. 1299–1307, 2004.
- DOWNIE, J. D. et al. Quasi-Single-Mode Fiber Transmission for Optical Communications. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 23, p. 31–42, 2017.

- ESPINOSA, A. G. et al. Closed-Loop Controller for Eliminating the Contact Bounce in DC Core Contactors. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 33, p. 535–543, 2010.
- ESPINOSA, A. G.; RUIZ, J.-R. R.; MORERA, X. A. A Sensorless Method for Controlling the Closure of a Contactor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 43, p. 3896–3903, 2007.
- FAN, H. et al. A novel FBG sensors network for smart structure vibration test. In: **2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1109–1113.
- FANG, L. et al. Application of Embedded Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors in Monitoring Health to 3D Printing Structures. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, p. 6604–6610, 2016.
- FANG, Z. et al. **Fundamentals of optical fiber sensors**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- FENG, J.; JIANG, Q. Slip and roughness detection of robotic fingertip based on FBG. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 287, p. 143–149, 2019.
- GHALAMESTANI, S. G. et al. Magnetostriction Measurement by Using Dual Heterodyne Laser Interferometers. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 46, p. 505–508, 2010.
- HBM. **Manual de operação**. 2019. Disponível em <http://www.tensometry-optyczn.pl/a2301.pdf>.
- HILL, K.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1263–1276, 1997.
- HONG, C. et al. A FBG based displacement transducer for small soil deformation measurement. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 286, p. 35–42, 2019.
- JEONG, S. W. et al. The Study on the Characteristics of Operating Limits of AC Contactor during Voltage Sag. **2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific**, p. 1–4, 2009.
- JUNIOR, A. A. G.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. [S.l.]: Manole, 2008.
- KANOKBANNAKORN, W.; SAENG SUWAN, T.; SIRISUKPRASERT, S. The modeling of AC magnetic contactor for immunity studies and voltage sag assessment. In: **The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 621–624.
- KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. California: Academic press, 2009.
- KOLTERMANN, P.; BASTOS, J.; ARRUDA, S. A model for dynamic analysis of AC contactor. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, p. 1348–1350, 1992.
- LI, Y.; YANG, K.; LI, X. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process. **Optical Fiber Technology**, v. 45, p. 368–375, 2018.
- MARTELLI, C. et al. Temperature sensing in a 175MW power generator. In: **OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 84212F–84212F–4.

- MORAES, P. M. D. S. D. de. **Controle Eletrônico da Corrente da Bobina de Contatores Eletromagnéticos**. 143 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- NETO, M. B. **Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura encapsulado em Alumínio**. 57 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- OH, K. et al. Novel hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 23, p. 524–532, 2005.
- OLIVEIRA, A. O. de. **Sistema para Medida Simultânea de Temperatura e Deformação com Redes de Bragg em 800 nm**. 89 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, São Carlos, 2012.
- OLIVEIRA, R. P. de. **Sensor Monoponto de Temperatura Baseado em Redes de Bragg Gêmeas**. 102 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. **Review of Scientific Instruments**, v. 68, p. 4309–4341, 1997.
- OTHONOS, A. Fiber bragg gratings. **Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**, Artech house, v. 4, 1999.
- PEDRA, J.; CORCOLES, F.; SAINZ, L. Study of AC contactors during voltage sags. In: **10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630)**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 565–570.
- PEDROSO, M. A. **Sensoriamento Quasi-Distribuído de Forças com Transdutores de Redes de Bragg em Fibras Óticas**. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- PENG, B.-J. et al. Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method. **IEEE Sensors Journal**, v. 6, p. 63–66, 2006.
- RIBA, J. R. et al. Design of Shading Coils for Minimizing the Contact Bouncing of AC Contactors. In: **2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 130–136.
- RIBA, J.-R. et al. Dynamic model for AC and DC contactors – Simulation and experimental validation. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, p. 1918–1932, 2011.
- RUIZ, J. R. R.; ESPINOSA, A. G. A novel parametric model for AC contactors. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 44, p. 2215–2218, 2008.
- RUIZ, J.-R. R.; ESPINOSA, A. G.; ROMERAL, L. A Computer Model for Teaching the Dynamic Behavior of AC Contactors. **IEEE Transactions on Education**, v. 53, p. 248–256, 2010.
- SANTANA, L. S. **Análise da Influência dos Afundamentos de TENSÃO e Harmônicas na Operação de Contatores de Corrente Alternada**. 119 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

SOUSA, K. d. M. et al. Validation of thermal and electrical model for induction motors using fiber Bragg gratings. **Measurement**, v. 46, p. 1781–1790, 2013.

SOUSA, K. M. et al. Broken Bar Fault Detection in Induction Motor by Using Optical Fiber Strain Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, p. 3669–3676, 2017.

SOUSA, K. M. et al. Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, p. 4786–4792, 2016.

SUZUKI, T.; MATSUMOTO, E. Comparison of Jiles–Atherton and Preisach models extended to stress dependence in magnetoelastic behaviors of a ferromagnetic material. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 161, p. 141–145, 2005.

THEUNE, N. et al. Investigation of stator coil and lead temperatures on high voltage inside large power generators via use of fiber Bragg gratings. In: **Proceedings of IEEE Sensors**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1603–1607.

TOMASI, W. **Sistemas de comunicaciones electrónicas**. México: Pearson educación, 2003.

UDD, E.; JR, W. B. S. **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. Sao Paulo: Editora Blucher, 1996.

WADA, M.; YOSHIMOTO, H.; KITAIDE, Y. Dynamic analysis and simulation of electromagnetic contactors with AC solenoids. In: **IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 2745–2751.

WEG. **Folha de dados**. 2019. Disponível em <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automação-e-Control-Industrial/Controls/Partida-e-Proteção-de-Motores/Contatores/Potência/Contatores-CWM/CONTATOR-CWM50-00-30V26/p/10186001>.

WEI-GEN, C. et al. The measuring method for internal temperature of power transformer based on fbg sensors. In: **2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 672–676.

YAN, S. et al. In situ measurement of strains at different locations in 3-D braided composites with FBG sensors. **Composite Structures**, v. 230, p. 111527, 2019.

YIN, S.; FRANCIS, T. **Fiber optic sensors**. New York: CRC press, 2008.

ZHANG, X. et al. Real-time temperature monitoring system using fbg sensors on an oil-immersed power transformer. **High Voltage Engineering**, v. 40, p. 253–259, 2014.

APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DAS FBGs DE TEMPERATURA

Para realizar o processo de calibração das FBG utilizou-se o banho termostático, o interrogador óptico e um computador, para aquisição de dados. A Figura 41 ilustra o sistema de aquisição de dados com o esquemático da calibração de temperatura das três FBGs. Dentro do banho térmico tem-se a água destilada, na qual foram colocados as FBGs, livres de tração mecânica e vibrações.

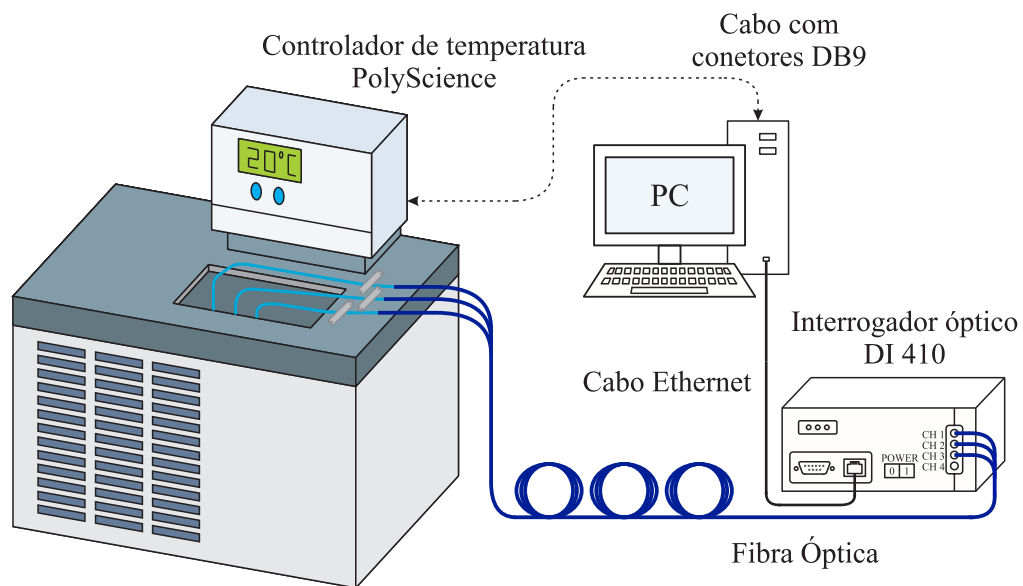


Figura 41: Esquemático da calibração em temperatura das FBGs

O processo de calibração das FBGs foram realizados mediante a variação da temperatura do banho térmico, pelo controlador de temperatura na qual definiu-se uma faixa de temperatura de 10 °C até 95 °C, com passos de 10 °C a partir de 10 °C até 90 °C e um passo 5 °C até atingir a máxima temperatura na calibração de 95 °C. Esse processo repetiu-se de 95 °C até 10 °C para que houvesse a possibilidade do cálculo das médias.

Nas Tabelas 6, 7 e 8 se ilustram os valores médios das temperaturas e dos comprimentos de onda de *Bragg* dos sensores 1, 2 e 3, no decorrer do dois ciclos

Tabela 6: Valores da calibração do sensor 1 de temperatura.

Temperatura (°C)	Valor médio do λ_B (nm)	Desvio padrão (pm)
10,031	1543,408	0,028
20,015	1543,501	0,306
29,999	1543,597	0,267
39,995	1543,695	0,559
50,008	1543,796	0,460
60,004	1543,898	0,554
69,995	1544,003	0,262
79,995	1544,110	0,409
89,988	1544,220	0,077
94,962	1544,276	0,707

Tabela 7: Valores da calibração do sensor 2 de temperatura.

Temperatura (°C)	Valor médio do λ_B (nm)	Desvio padrão (pm)
10,034	1539,822	0,777
20,004	1539,915	0,332
29,995	1540,012	0,592
40,004	1540,110	0,435
50,008	1540,211	0,665
60,000	1540,314	0,873
69,989	1540,418	0,573
79,989	1540,525	1,061
89,970	1540,635	0,245
94,990	1540,692	0,707

Tabela 8: Valores da calibração do sensor 3 de temperatura.

Temperatura (°C)	Valor médio do λ_B (nm)	Desvio padrão (pm)
10,034	1539,999	0,708
20,004	1540,093	0,107
29,995	1540,189	0,169
40,004	1540,288	0,292
50,008	1540,388	0,141
60,000	1540,492	0,076
69,989	1540,597	0,021
79,989	1540,703	0,143
89,970	1540,814	0,025
94,990	1540,869	0,707

Com os valores médios das temperaturas e dos comprimentos de onda das Tabela 6, 7 e 8 e o *software* Matlab®, foram obtidas as linhas de tendência linear com suas respectivas equações, como pode se observar na Figura 42. A variação do comprimento de onda por grau Célcius pode ser obtida dessa equação, cujo valor é 10,24 pm/°C para o sensor 1, 10,26 pm/°C para o sensor 2 e 10,26 pm/°C para o sensor 3.

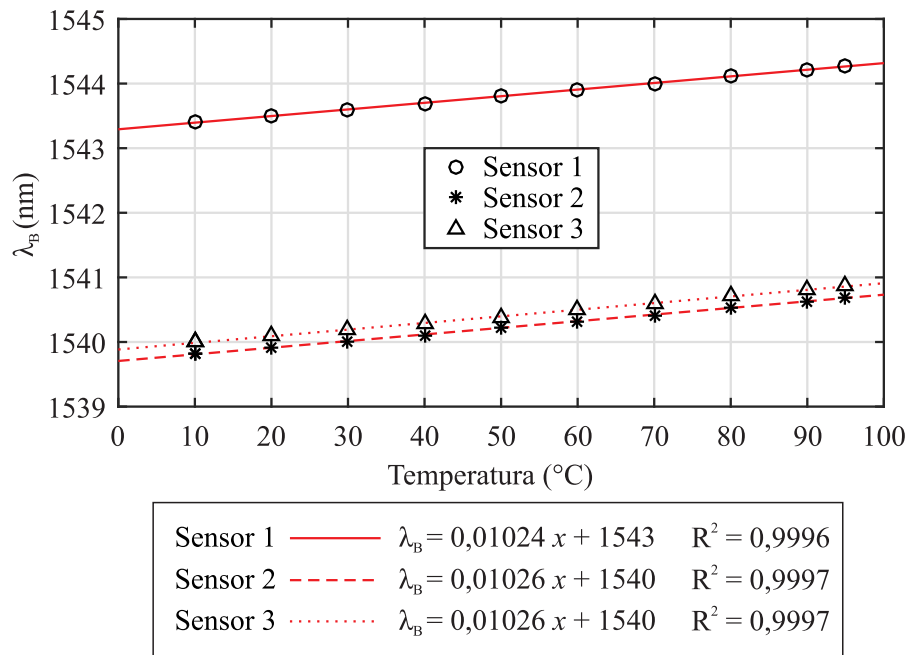


Figura 42: Curva da calibração em temperatura dos sensores 1, 2 e 3.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO INTERROGADOR ÓPTICO

DI...

45

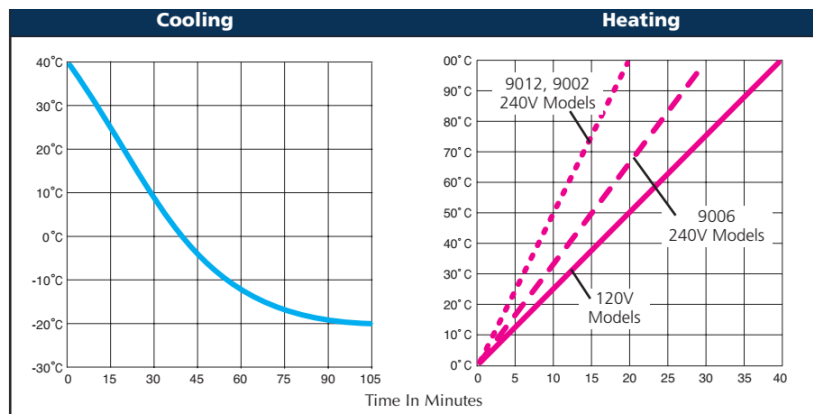
7 Specifications

Type		DI101	DI105	DI110	DI405	DI410
Number of optical sensor chains that can be connected		1	1	1	4	4 ¹⁾
Wavelength range (Measuring range)	nm	1510... 1590	1510... 1590	1510... 1590	1510... 1590	1510... 1590
Wavelength variation per 10 K	pm	< 2				
Repeatability ²⁾	pm	1 resp. 0.05 with averaging of 1000 measuring values				
Dynamic range	dB	25 (adaptable amplification)				
Sampling rate	1/s	100	500	1000	500	1000
Max. data transmission rate	1/s	50000				
Optical connector sockets		FC/APC				
Ambient conditions						
Nominal temperat. range	°C [°F]	0...+50 [+32...+122]				
Ambient humidity range	% rel. h.	0...80, non-condensing				
Storage temperat. range	°C [°F]	-20...+70 [-4...+158]				
Storage humidity range	% rel. h.	0...95, non-condensing				
Electrical connection values						
Supply voltage	V	+12 (+7...+36) via power pack				
Power pack	V _{AC}	100...240 (with 47...63 Hz)				
Power consumption	W	typ. 25, max. 50				
Interface		Ethernet (TCP-IP)				
Weight, approx.	kg	2.5				

¹⁾expandable to 8 or 16 channels via Multiplexer 1-M408 or 1-M416

²⁾NIST Technical Note 1297, 1994

ANEXO B – FOLHA DE DADOS DO BANHO TÉRMICO



9000 Series Specifications	
Reservoir Capacity	6 liters
Cooling Capacity @	+20°C 200 Watts 0°C 140 Watts -10°C 100 Watts
Over-Temperature Cutoff	Adjustable
Low-Liquid Cutoff	Yes
Working Access l x w x d	5 1/4 x 5 1/4 x 5 1/2 in. 13.3 x 13.3 x 14 cm
Overall Dimensions l x w x h	15 3/4 x 18 3/4 x 17 in. 40 x 47.6 x 43.2 cm
Pump Inlet and Outlet	1/4 in. FPT Rear Discharge

Note: For Cooling Capacity (Watts x 3.41) = BTU/hr.

---Tech Tip---

- ✓ For optimum performance locate your circulator on a level surface free from drafts and direct sunlight.
- ✓ Avoid locations where corrosive fumes, excessive moisture, or excessive dust are present.
- ✓ Protect against voltage drops by using properly grounded power outlets wired with 14 gauge or larger diameter wire. Locate the circulator close to the power outlet.

Specifications	Model 9012	Model 9002	Model 9006
Temperature Range	-20° to 200°C	-20° to 200°C	-20° to 150°C
Temperature Stability	±.01°C	±.01°C	±.05°C
Controller / RS232	Programmable / Yes	Advanced Digital / Yes	Standard Digital / No
Readout	Graphic LCD	Graphic LCD	LED
Temperature Readout	°C or °F	°C or °F	°C or °F
Readout Accuracy	± 0.25°C	± 0.25°C	± 0.5°C
Pressure Flow Rate	30 lpm max. (60 Hz) 22 lpm max. (50 Hz)	30 lpm max. (60 Hz) 22 lpm max. (50 Hz)	2-speed, 9 or 15 lpm
Suction Flow Rate	22 lpm max. (60 Hz) 15 lpm max. (50 Hz)	22 lpm max. (60 Hz) 15 lpm max. (50 Hz)	N/A
Heater	60Hz 1100 Watts 50Hz 2200 Watts	1100 Watts 2200 Watts	1100 Watts 1600 Watts
Shipping Weight	74 lbs / 34 kg	70 lbs / 32 kg	67 lbs / 30.4 kg
Cat. No. 120V, 60Hz, 12A	9012A11B	9002A11B	9006A11B
Cat. No. 240V, 50Hz, 9.9A	9012A12E	9002A12E	9006A12E